



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

PROYECTO FIN DE CARRERA

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA**

**Estudio y cálculo de torres de refrigeración de tiro
inducido y flujo cruzado**

AUTOR:

D. Andrés Blanco García

TUTOR:

Dr.D. Domingo Santana Santana

Febrero 2011

Agradecimientos

Mi mas sincero agradecimiento a todas las personas que con su apoyo han hecho posible la realización de este proyecto.

Gracias a Domingo por su paciencia y consejos.

Gracias a mis amigos, a mis compañeros de clase y prácticas, a los profesores que se esforzaron en enseñar lo que sabían, a mi novia, a mis hermanos y en especial a mis padres sin cuyo esfuerzo y principios hubiera sido imposible llegar aquí.



INDICE

Capítulo 1. Introducción.

- 1.1. - Resumen del proyecto.....Pag.4
- 1.2. - Estructura del proyecto.....Pag.5

Capítulo 2. Torres de refrigeración.

- 2.1. - Introducción.....Pag.7
- 2.2. - Tipos de torres de refrigeración.....Pag.8
- 2.3. - Selección de torres de refrigeración.....Pag.14

Capítulo 3. Torres de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado.

- 3.1. - Introducción.....Pag.18
- 3.2. - Transferencia de masa y y calor
en torres de refrigeración húmeda.....Pag.20
- 3.3. - Método de eficiencia-NTU
aplicado a sistemas evaporativos.....Pag.26
- 3.4. - Ventiladores y difusores.....Pag.31
- 3.5. - Empaquetamientos.....Pag.46
- 3.6. - Eliminadores de gotas.....Pag.53

Capítulo 4. Método de cálculo.

- 4.1. - Introducción.....Pag.57
- 4.2. - Datos de partida.....Pag.58
- 4.3. - Inicio del método.....Pag.60
- 4.4. - Desarrollo del método.....Pag.66
- 4.5. - Comprobación del método.....Pag.82

Capítulo 5. Interfaz usuario de la aplicación informática.

- 5.1. - Introducción.....Pag.86
- 5.2. - La herramienta GUIDE de Matlab.....Pag.87
- 5.3. - Diagrama de flujo de la aplicación.....Pag.97
- 5.4. - Interfaz gráfica de la aplicación.....Pag.98
- 5.5. - Ejemplo de uso del programa.....Pag.113

Capítulo 6. Código de programación.

- 6.1. - Introducción.....Pag.121
- 6.2. - Portada.m.....Pag.122
- 6.3. - TorreHumedaGui.m.....Pag.124
- 6.4. - AyudaVentilador.m.....Pag.134
- 6.5. - AyudaEmpaq.m.....Pag.135
- 6.6. - TorreHum.m.....Pag.136
- 6.7. - FlujoMasico.m.....Pag.139
- 6.8. - CorreVaporAireAgua.m.....Pag.142
- 6.9. - CorreAgua.....Pag.143
- 6.10. - ResultadosGui.m.....Pag.144

Capítulo 7. Conclusiones.

- 7.1. - Conclusiones.....Pag.151

Bibliografía e Índices.....Pag.152





Capítulo 1. Introducción.



1.1. Resumen del Proyecto.

En la realización de este proyecto se ha querido desarrollar un método de cálculo para el comportamiento de torres húmedas de tiro inducido y flujo cruzado, el cual, tras demostrar que llega a resultados correctos, se implementará en lenguaje de programación Matlab, lo que permitirá disponer de una aplicación informática gráfica de apoyo al diseño de este tipo de torres.

Se pretende que este proyecto sea parte de un conjunto de aplicaciones informáticas, con las que estudiar y calcular los diversos tipos de torres de refrigeración.

Este es entonces, el objetivo primordial de este proyecto, el desarrollo y optimización de un programa informático que sirva para comprobar que el diseño realizado se ajusta a los requerimientos, así como para ayudar al diseño en algunas fases para este tipo de torres.

Se ha desarrollado un método por el cual, partiendo de las características geométricas, componentes de la torre y propiedades de los fluidos involucrados en el intercambio de calor, se muestra como han cambiado dichas propiedades al atravesar la torre, el calor intercambiado y el acercamiento conseguido.

Se ha desarrollado una aplicación informática gráfica, utilizando la herramienta GUIDE del programa de cálculo matemático Matlab.



1.2. Estructura del proyecto.

Este proyecto está englobado en una serie de proyectos fin de carrera, futuros y pasados que tienen como objetivo una descripción global de las torres de refrigeración. La estructura para este proyecto ha sido organizada de la siguiente manera:

-Capítulo 2: Se pretenden exponer los tipos de torres de refrigeración mas utilizados, ventajas e inconvenientes, así como usos más habituales.

-Capítulo 3: Exposición de conocimientos teóricos y fórmulas matemáticas asociadas, necesarios para el entendimiento del método usado.

-Capítulo 4: Desarrollo del método de cálculo del comportamiento de torres de refrigeración de tiro inducido en flujo cruzado.

-Capítulo 5: Se detalla y explica el código informático utilizado como herramienta para implementar el método.

-Capítulo 6: Se detalla el código Matlab implementado.

-Capítulo 7: Se explican las conclusiones extraídas de la realización del proyecto y realizaciones futuras.



Capítulo 2. Torres de refrigeración



2.1. Introducción.

En todo ciclo de generación de energía o refrigeración, el calor debe ser eliminado. Sucede así en plantas de proceso y químicas, motores de combustión interna, ordenadores y sistemas electrónicos.

En centrales térmicas de combustibles fósiles, con una eficiencia de alrededor del 40%, más del 40% del calor de entrada debe ser transferido fuera por los sistemas de refrigeración. En centrales nucleares con menor eficiencia, aun más calor debe ser disipado.

El método de refrigeración más simple y barato usado durante años, fue mediante el uso de intercambiadores de calor que daban entrada agua de ríos u océanos y lo devolvían a estos a una temperatura más elevada. En los países industrializados, el aumento de temperatura permitido esta a menudo limitado e impide el uso de agua directo de la naturaleza. En estos casos, el agua que se utiliza para disipar el calor generado está continuamente re-circulando por la torre, o torres, de refrigeración para transferirlo directamente a la atmósfera.

Por lo tanto, la razón primordial de uso de las torres de refrigeración húmedas es disipar el calor generado en un proceso, contenido en el agua, y devolverlo a la atmósfera de una forma eficiente y económica.

Las torres de tiro mecánico, provistas de ventiladores y motores, son las más comunes, y pueden ser de tiro forzado, con ventiladores inyectando aire en su parte baja, o de tiro inducido, con los ventiladores expulsando aire en su parte alta.

Las torres de flujo cruzado y tiro inducido, tradicionalmente se han construido con estructuras de madera, y utilizan riego por gravedad. Su ventaja principal es tener menor presión estática del aire y del agua, con el consiguiente ahorro de energía, importante en tamaños grandes. Otra ventaja importante es que el ensuciamiento o incrustaciones de las aletas de los ventiladores es menor que en el tipo de tiro forzado, ya que el aire entra primero en contacto con el agua, que ejerce un efecto de lavado, manteniendo las aletas limpias.



2.2. Tipos de Torres de Refrigeración

Debido a la relativa simplicidad del mecanismo evaporativo que usa una torre de refrigeración, existen una infinidad de tipos de torres, por lo que expondremos los más usuales. Hay que recordar que todas ellas se rigen por el mismo principio: disipar el calor del agua a la atmósfera mediante enfriamiento evaporativo.

Se podrían realizar diversas clasificaciones tipológicas, por ejemplo:

- Atendiendo a tiro natural o tiro forzado.
- Atendiendo a flujo cruzado o contra flujo.
- Húmedas, secas o híbridas.

Se intentará no hacer una clasificación exhaustiva, sino explicar los tipos mas comunes.

Torres de tiro natural

En las torres de tiro natural el flujo másico de aire que atraviesa la torre es creado por la diferencia en densidades entre el aire húmedo y caliente dentro de la torre y el aire exterior mas denso. Existen tipos con flujos cruzado y a contracorriente.

Las torres de hormigón características de este tipo de torres tienen forma hiperbólica y habitualmente sobrepasan los 180 m. de altura. Es posible reducir el tamaño de las torres instalando ventiladores axiales en su base.



Fig.2.1. Torres de tiro natural en central térmica



Torre de tiro natural en flujo cruzado.

Las torres de flujo cruzado tienen una configuración de empaquetamiento en la cual el aire fluye de forma perpendicular al agua que desciende de forma vertical. El agua caliente es repartido a las balsas de distribución situadas sobre el empaquetamiento, montado este en anillo alrededor de la base de la torre, y es distribuido por gravedad a través de boquillas de baja presión en el suelo de la balsa. Esta disposición hace mas fácil el mantenimiento, ya que el empaquetamiento es mas accesible, pero baja la eficiencia termodinámica.

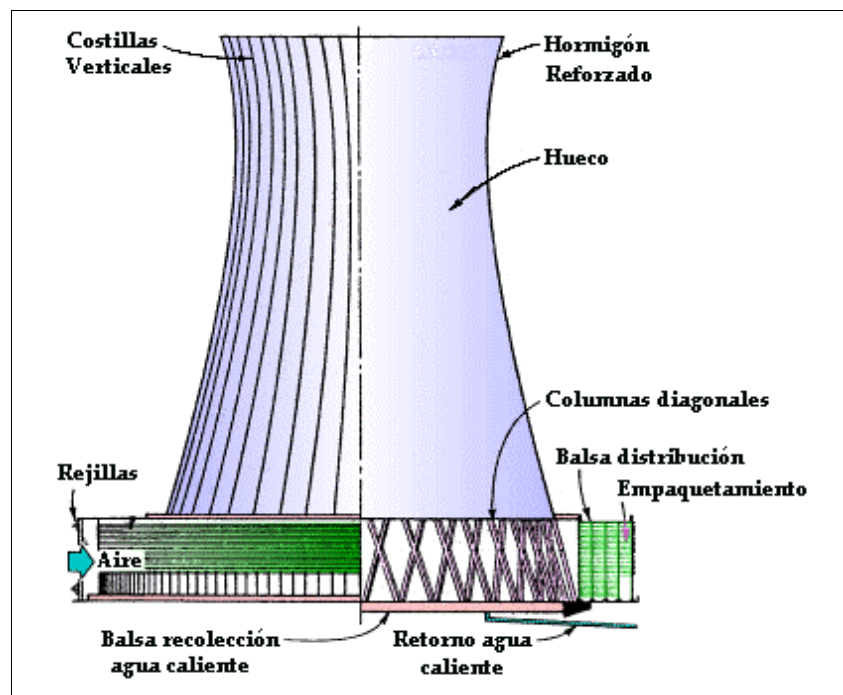


Fig.2.2.Torre de tiro natural en flujo cruzado

Torre de tiro natural en contra flujo.

En este tipo, el aire fluye verticalmente hacia arriba, y el agua verticalmente hacia abajo. La aspersión en la parte alta del empaquetamiento se realiza mediante boquillas a presión.

Se caracterizan por su gran altura, la cual provoca, debido a la diferencia de densidades de aire a la entrada y salida, que el aire circule a través de ella de forma natural. A causa de esto, se pueden producir cambios climáticos cerca de ellas al expulsar el aire caliente, y como este sale casi saturado, se pueden dar casos de corrosión en estructuras metálicas adyacentes.

Dentro del tiro natural, se puede ayudar a este por medio de ventiladores, lo que sería un tiro combinado.

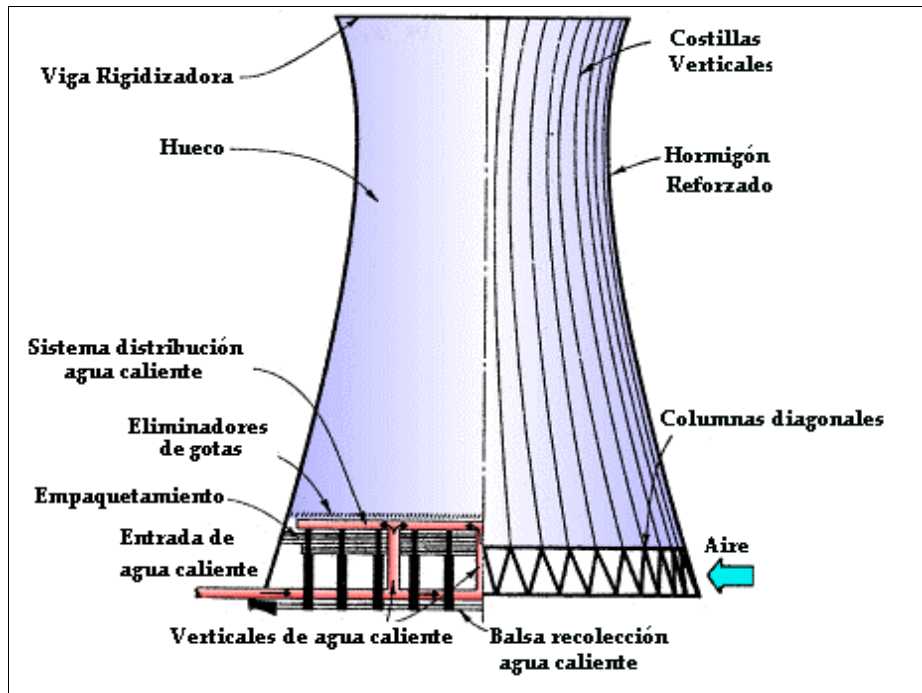


Fig.2.3. Torre de tiro natural en contra flujo

Torre de tiro natural de tiro asistido a contra flujo

En este tipo de torres se sitúan un determinado numero de ventiladores en la entrada de la torre, forzando al flujo de aire a entrar en ella. Esto es usado en lugares con temperaturas ambientales elevadas, porque existe una menor diferencia de temperaturas entre el interior y exterior de la torre y un consecuente menor flujo másico la atraviesa. También deben ser consideradas cuando la recirculación de la columna de aire es excesiva, es decir, parte del aire en la salida recircula hacia la entrada. También se usan para reducir la altura de la torre en lugares donde el efecto visual y medioambiental de estas es un factor determinante.

Torre de tiro natural de tiro asistido a flujo cruzado.

Los ventiladores están situados entre la entrada de aire a la torre y el empaquetamiento. También se busca en este uso reducir la altura de la torre.



Torres de tiro mecánico

El suministro de aire a la torre se hace por medio de un ventilador que fuerza una corriente de aire en la torre, venciendo una resistencia.

Al principio se usaron ventiladores centrífugos, pero debido al menor coste y menor desgaste de palas se usan los ventiladores axiales.

Existen 2 tipos atendiendo a la forma de hacerlo, si el ventilador se encuentra a la entrada de la torre el tiro es forzado, y si se situá cerca de la salida el tiro es inducido.



Fig.2.4. Torres de tiro mecánico

Torre de tiro inducido en flujo cruzado.

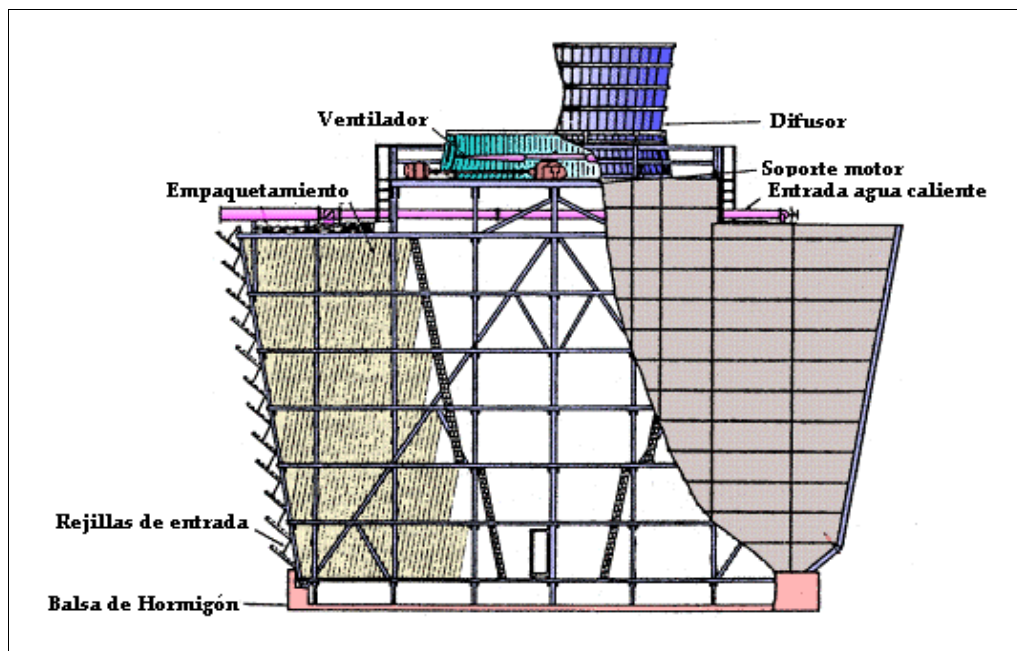


Fig.2.5. Torre de tiro inducido y flujo cruzado



En este tipo de torres, el aire fluye de forma horizontal en el empaquetamiento de la torre inducido por la acción del ventilador en la parte superior, mientras que el agua fluye diagonalmente por gravedad a través del empaquetamiento.

El empaquetamiento es instalado a un cierto ángulo con la vertical para disminuir la fuerza de arrastre de la corriente de aire entrante sobre el agua, impidiendo así que el agua abandone el empaquetamiento antes de tiempo.

La configuración de flujos cruzados permite disminuir la altura de la torre, ya que para conseguir un mayor flujo másico de aire en la entrada es suficiente con aumentar el ancho de esta.

La recirculación entre entrada y salida es menor que en torres de tipo forzado, ya que la ubicación del ventilador en la salida permite mayores velocidades en salida y menores velocidades en la entrada. Para mover la misma masa de aire, se requiere una mayor potencia en el ventilador que en tiro forzado ya que este está mas caliente y contiene una mayor cantidad de vapor de agua que el aire a la entrada.

Torre de tiro inducido en contra flujo

Como en el tipo anterior el ventilador se sitúa a la salida de la torre, mejorando así la recirculación.

El aire fluye en dirección vertical y en sentido contrario al agua. Este hecho minimiza la velocidad del aire por lo que requiere al ventilador una mayor pérdida de carga.

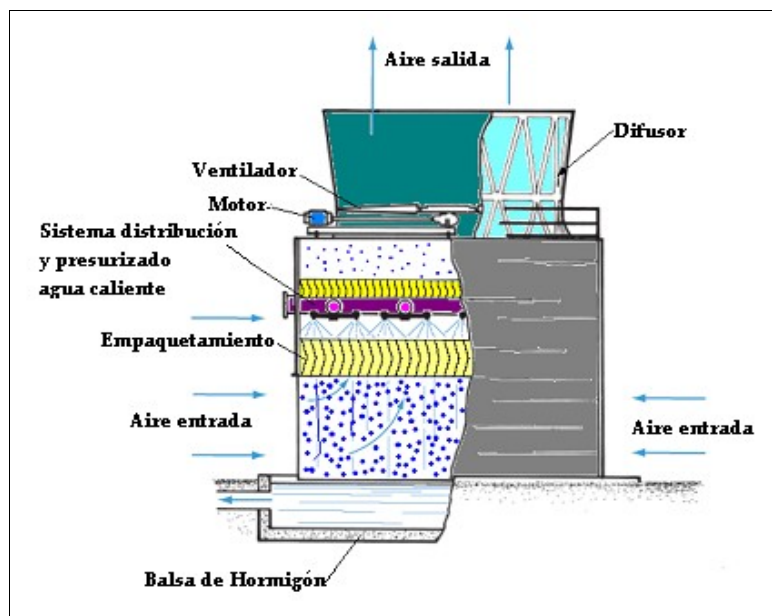


Fig.2.6.Torre de tiro inducido en contra flujo



En contrapunto con el tipo anterior requiere de una mayor presión en el sistema de bombeo, para alcanzar a cubrir toda la superficie del empaquetamiento.

Torre de tiro forzado en contra flujo

El ventilador se sitúa a la entrada del flujo de aire en la torre por lo que es forzado a entrar en el sistema. El aire pasará a través del empaquetamiento donde ha sido pulverizada el agua por los sprays produciéndose el intercambio de calor.

Su mantenimiento es fácil de realizar, y tienen la ventaja de que el ventilador trabaja con aire “seco” disminuyendo así la potencia al eje.

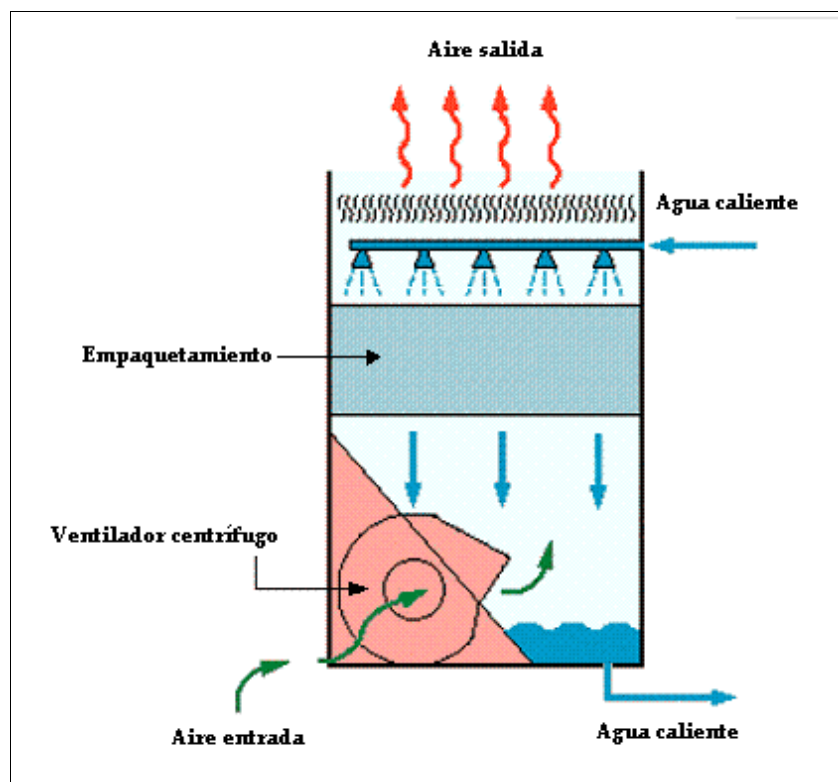


Fig.2.7. Torre de tiro forzado en contra flujo



2.3. Selección de Torres de Refrigeración

Las torres de refrigeración son diseñadas y construidas en diversas configuraciones y tamaños, por lo que reconocer y comprender las diferentes configuraciones, ventajas y limitaciones de cada una es básico de cara a especificar la solución mas efectiva para un determinado uso.

El propósito de este apartado es poner de relieve las diferencias entre torres de refrigeración de tiro inducido en contra flujo y en flujo cruzado.

La eficiencia total de una torre de refrigeración está relacionada directamente con el diseño del sistema de distribución de agua caliente. Una de las consideraciones fundamentales a la hora de elegir el sistema de distribución de agua caliente será la presión y, en extensión, coste energético que requiere la instalación. La presión requerida por tal sistema será una suma de energía potencial (relacionada con la altura de la torre), mas la energía necesaria para mover el agua a través del sistema de distribución y empaquetamiento.

En las torres a contracorriente el movimiento del aire es vertical y hacia arriba a través del empaquetamiento en sentido contrario al flujo de agua que cae. Las torres con sistemas en contracorriente necesitan una elevada presión en las boquillas de distribución para alcanzar a cubrir toda la superficie del empaquetamiento. El tamaño de gotas pulverizadas en las boquillas es sensible a cambios en el flujo másico de agua y por lo tanto al cambio en la presión en boquilla.

Las torres en contra flujo tienen un área de intercambio mas pequeño que las torres en flujo cruzado, pero requieren altura adicional, mayor presión estática y dinámica para alcanzar el mismo efecto de refrigeración.

En las torres en configuración de flujo cruzado el movimiento del aire es horizontal a través del empaquetamiento atravesando la caída diagonal del agua. En ellas el agua caliente es distribuida a lo largo del empaquetamiento por gravedad, y es repartido a través de orificios en el suelo de la balsa de entrada, situada encima del empaquetamiento. Por lo tanto, no es necesario ningún sistema de distribución por boquillas presurizadas y ningún sistema de bombeo.

Por lo tanto, comparando ambas torres diremos que las torres en contracorriente requieren alrededor de 35 a 42 kPa sumadas a la presión de bombeo, para alcanzar la distribución apropiada de las gotas en forma de spray. Los elevados requerimientos de presión (altura de torre mas presión en boquilla) conllevan un mayor gasto de instalación y significantes gastos anuales en consumo de energía de bombas y gastos de operación y mantenimiento. Además, si el sistema no estuviese correctamente dimensionado, la presión adicional requerida sería insuficiente y esto repercutiría en un inadecuado flujo de agua caliente, reduciendo así la eficiencia y rendimiento de la torre.



El rendimiento de una torre está relacionado con la cantidad de aire que circula por la torre y que consigue entrar en contacto con el agua contenido en el empaquetamiento. En contra flujo esta cantidad es mayor, debido al pequeño tamaño de las gotas de agua procedentes del sistema presurizado. Sin embargo, la resistencia al flujo másico de aire, tiene como resultado una mayor pérdida de presión estática y potencias al eje del ventilador mayores que en un sistema en flujo cruzado.

Las torres de tiro inducido y flujo cruzado utilizan toda la altura de la torre para admisión de aire, reduciendo así la velocidad de entrada de este y minimizando la recirculación. Por el contrario, la entrada de aire en contra flujo está restringido a la base de la torre, incrementando con ello la velocidad de entrada y la susceptibilidad a entrada de polución y recirculación en la torre.

Haremos un resumen de las ventajas e inconvenientes de los dos tipos de torres:

Tiro inducido y flujo cruzado

Ventajas:

- Menor potencia de bombeo.
- Menores costes de instalación.
- Menor consumo de energía anual y costes de operación.
- Permite mayores variaciones de flujo másico de agua sin disminución de rendimiento de la torre.
- Fácil acceso y mantenimiento de la distribución de agua.
- Baja presión estática de gotas.
- Menores pérdidas de carga en el circuito.
- Recirculación reducida.
- Mayor cantidad de aire por potencia al eje del ventilador .
- Se pueden utilizar diámetros de ventilador mayores, por lo que se requiere menor cantidad de torres para una potencia requerida.

Inconvenientes:

- Menores presiones en la distribución del agua caliente puede ocasionar obstrucción de los orificios.
- La exposición al aire de la balsa de agua caliente puede acelerar el crecimiento de algas. Mayor área en planta.
- Difícil control de formación de hielo, debido a la mayor superficie de rejillas en la entrada de aire.



Tiro inducido y contra flujo

Ventajas:

- Alturas de torre mayores consiguen rangos y acercamientos mayores.
- Uso más eficiente del aire debido al menor tamaño de las gotas de agua procedentes de las boquillas de distribución.
- El movimiento vertical a lo largo del empaquetamiento permite al aire mas frío entrar en contacto con el aire mas seco, maximizando el rendimiento de la torre.

Inconvenientes:

- Mayores presiones para el sistema de presurización del agua caliente.
- Mayores gastos energéticos y costes de operación y mantenimiento.
- Las boquillas de distribución dificultan la inspección y limpieza del empaquetamiento y del resto del sistema, ya que deben ser desmontadas.
- Requiere tuberías individuales para cada torre, por lo que aumenta el coste de estas.
- La resistencia al flujo de aire debida al agua resulta en una pérdida de carga y potencia del ventilador mayores.
- Aumento en la potencia al eje del ventilador debido al menor área de entrada del aire en la base de la torre.
- Tendencia a distribución no uniforme del flujo de aire a través del empaquetamiento con poco movimiento cerca de las paredes y el centro de la torre.
- Altas velocidades de entrada a la torre son propensas a introducir polución y recircular el aire.

Para concluir, diremos que las torres de tiro inducido y flujo cruzado deben ser usadas cuando existen los siguientes criterios y limitaciones:

- Minimizar la presión del sistema de distribución de agua.
- Minimizar costes de instalación y mantenimiento.
- Cuando se esperan variaciones en el flujo de agua del condensador.
- Cuando la facilidad en el mantenimiento es un requisito.



Capítulo 3. Torres de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado



3.1.Introducción

En este capítulo se intenta explicar en profundidad el funcionamiento de una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado. Para ello se parte de los fundamentos teóricos de cálculo en torres de refrigeración húmedas, para después estudiar cada uno de sus componentes por separado.

El funcionamiento de una torre de refrigeración de tiro inducido se basa en el uso de un ventilador que induce una corriente de aire. Este aire penetra a través de unas rejillas situadas en ambos laterales de la torre, y atraviesa una zona denominada empaquetamiento, donde se produce intercambio de calor entre el aire caliente y el aire exterior. El intercambio de calor es producido en un alto porcentaje por enfriamiento evaporativo, en virtud del cual parte del agua caliente se evapora y pasa a formar parte del aire entrante, formando una mezcla saturada de aire y vapor.

A consecuencia de este proceso el agua disminuye su temperatura y el aire abandona el empaquetamiento arrastrando agua aun en estado líquido, en forma de gotas, que son separadas de la corriente por eliminadores.

El agua a enfriar se distribuye por gravedad desde las balsas situadas sobre el empaquetamiento mediante orificios practicados en el suelo de estas.

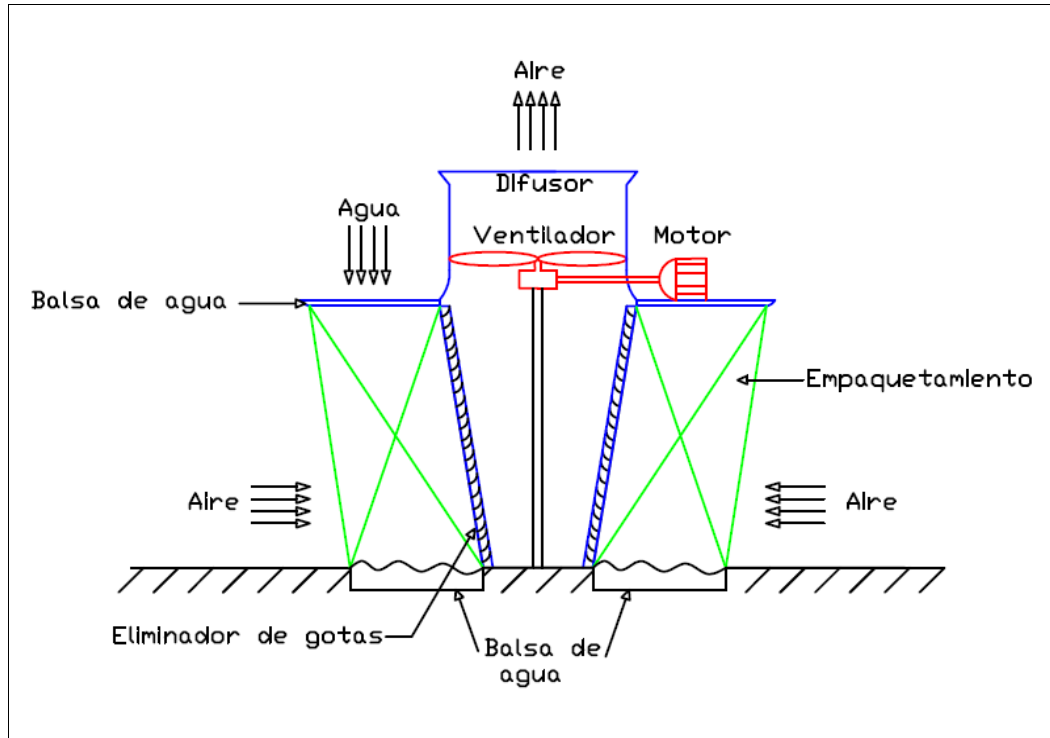


Fig.3.1. Esquema de una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado



Las partes principales de una torre de refrigeración húmeda de tiro natural en flujo cruzado son:

-*Ventilador*, induce una corriente de aire en la entrada de la torre. Los más empleados son los de tipo axial. El uso de ventiladores centrífugos suele estar limitado a torres de pequeño tamaño, sobre todo para montaje en interior, con ductos de descarga de aire húmedo, o en sitios donde es esencial un muy bajo nivel de ruido.

-*Difusor*, usado para disminuir la velocidad de salida del aire y por lo tanto el consumo de potencia al eje del ventilador.

-*Empaquetamiento*, distribuye y aumenta la cantidad de agua en contacto con aire y también el tiempo de intercambio.

-*Eliminadores de gotas*, son láminas de diferentes materiales que gracias a su forma ondulada consiguen cambiar la dirección de la mezcla aire-agua eliminando así las gotas de agua líquida.

-*Motor y transmisión*, proporcionan la potencia al eje del ventilador. Se suelen usar motores trifásicos, cerrados y autoventilados, aptos para uso en intemperie. En tamaños pequeños, hasta 12CV se usan transmisiones de poleas y correas trapezoidales. En tamaños mayores a 12CV se usa transmisión por reductor helicoidal.

-*Balsas de agua*, para este tipo de torres hay 2 tipos, la del agua caliente situada sobre el empaquetamiento y la del agua fría situada debajo. Suelen ser de hormigón y tienen dos funciones, uno de contención del agua y otro como fundación que soporta la estructura de la torre.

Una vez explicado de forma simple el funcionamiento y partes de las torres de refrigeración húmeda de tiro mecánico inducido en flujo cruzado, vamos a exponer los fundamentos teóricos en los que basaremos el desarrollo del método de cálculo del comportamiento de estas torres y su posterior implementación en lenguaje informático.



3.2. Transferencia de masa y calor en torres de refrigeración húmeda

Considerar un volumen de control en el empaquetamiento de una torre a contra flujo como el de la figura:

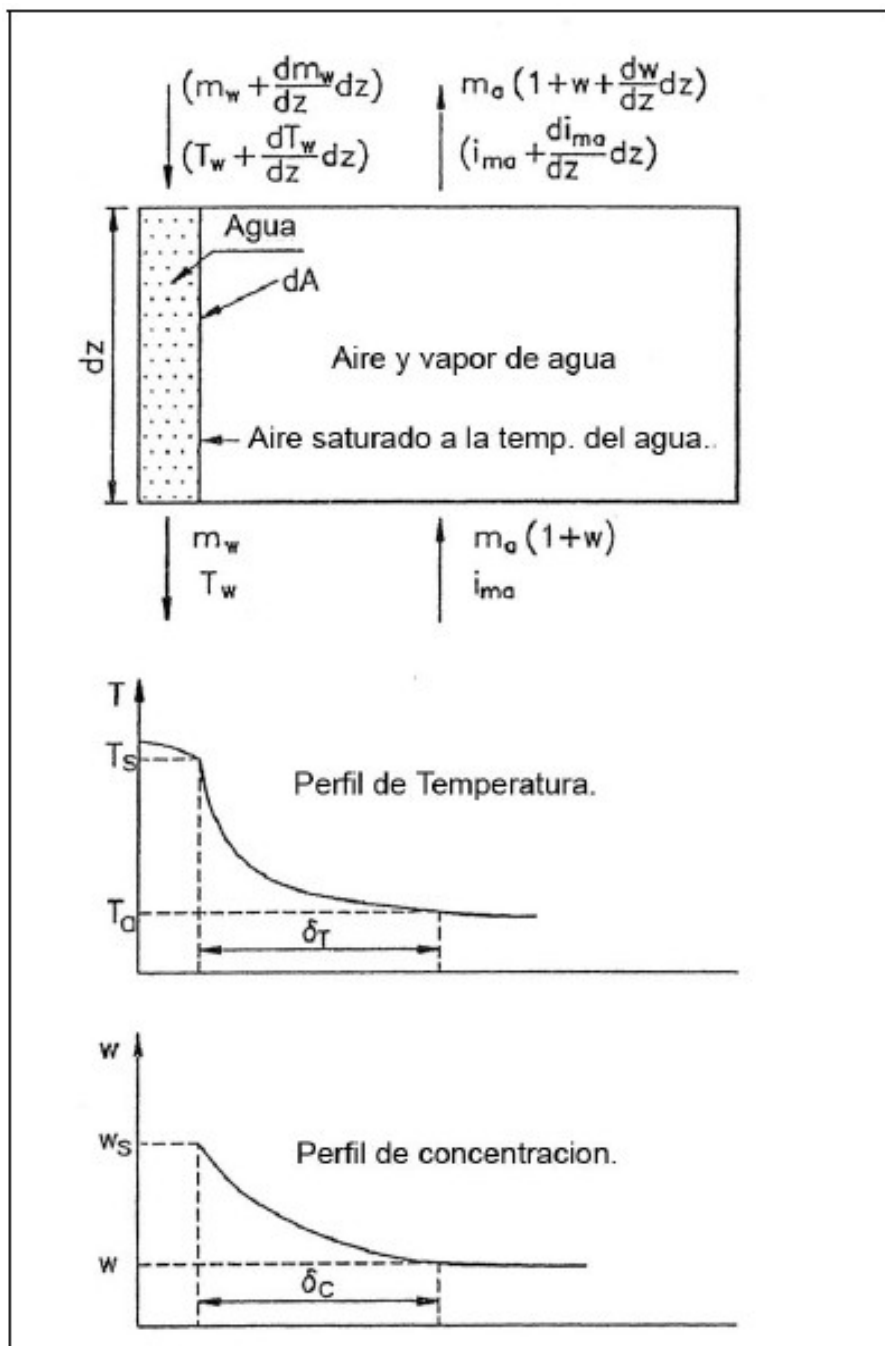


Fig.3.2. Volumen de control torres húmedas



La evaporación del flujo descendente de agua ocurre en la interfase aire-agua donde el aire está saturado con vapor de agua. El vapor difunde dentro de la corriente de aire que tiene una concentración de vapor menor.

Se asume que la temperatura T_s en la interfase es la misma que la temperatura del agua a refrigerar, T_w . Por lo tanto, las propiedades tanto del aire como del agua en cualquier sección horizontal se asumen constantes, y el área dA es igual para el intercambio de calor y de masa.

La conservación de la masa quedaría:

$$m_a(1+w) + \left(m_w + \frac{dm_w}{dz} dz \right) = m_a \left[1 + \left(w + \frac{dw}{dz} dz \right) \right] + m_w$$

Ec.3.1.

O también

$$\frac{dm_w}{dz} = m_a \frac{dw}{dz}$$

Ec.3.2.

Donde m_a es el flujo másico de aire que atraviesa la torre y m_w el de agua

El balance de energía en el volumen de control, resultaría:

$$m_a i_{ma} + \left(m_w + \frac{dm_w}{dz} dz \right) C_{pw} \left(T_w + \frac{dT_w}{dz} dz \right) = m_a \left(i_{ma} + \frac{di_{ma}}{dz} dz \right) + m_w C_{pw} T_w$$

Ec.3.3.

donde las unidades para T_w son °C.

Despreciando términos de segundo orden, la ecuación anterior se simplifica, quedando:

$$m_w C_{pw} \frac{dT_w}{dz} + C_{pw} T_w \frac{dm_w}{dz} = m_a \frac{di_{ma}}{dz}$$

Ec.3.4.

Donde i_{ma} es la entalpía de la mezcla aire-vapor por masa de aire seco, que se puede expresar como:

$$i_{ma} = C_{pa} T_a + w (i_{fgwo} + C_{pw} T_a)$$

Ec.3.5.



Donde i_{fgwo} es evaluada a 0°C y C_{pa}, C_{pv} a $T_a/2$ $^\circ\text{C}$.

Sustituyendo la ecuación 3.1. en la ecuación 3.3. obtendremos:

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{m_a}{m_w} \left(\frac{1}{C_{pw}} \frac{di_{ma}}{dz} - T_w \frac{dw}{dz} \right)$$

Ec.3.6.

La entalpía total transferida a la interfase aire-agua consiste en una parte asociada a la transferencia de masa debida a la diferencia de concentración del vapor y otra parte debida a la transferencia de calor por diferencia de temperatura, esto es:

$$dQ = dQ_m + dQ_c$$

Ec.3.7.

Donde los subíndices m y c se refieren a las entalpías asociadas con la transferencia de masa y calor por convección respectivamente.

La transferencia de masa en la interfase viene expresada por:

$$\frac{dm_w}{dz} dz = h_d (w_{sw} - w) dA$$

Ec.3.8.

Donde w_{sw} es la relación de humedad del aire en saturación evaluada a la temperatura local T_w .

La transferencia de entalpía es:

$$dQ_m = i_v \frac{dm_w}{dz} dz = i_v h_d (w_{sw} - w) dA$$

Ec.3.9.

La entalpía del vapor de agua, i_v , a la temperatura local T_w es dada por la ecuación:

$$i_v = i_{fgwo} + C_{pv} T_w$$

Ec.3.10.

Donde las unidades para T_w son $^\circ\text{C}$, y C_{pv} es evaluado a $T_w/2$.



La transferencia convectiva de calor sensible en la interfase viene dada por:

$$dQ_c = h(T_w - T_a)dA$$

Ec.3.11.

La entalpía del aire saturado evaluada a la temperatura local del agua T_w , vendrá dada por:

$$i_{masw} = C_{pa}T_w + w_{sw}(i_{fgw} + C_{pv}T_w) = C_{pa}T_w + w_{sw}i_v$$

Ec.3.12.

Que puede ser expresada así:

$$i_{masw} = C_{pa}T_w + wi_v + (w_{sw} - w)i_v$$

Ec.3.13.

Donde C_{pa} está calculada para $T_w/2$.

Restando la ecuación 3.4. a la ecuación 3.13. la ecuación resultante puede ser simplificada si las pequeñas diferencias en calores específicos, los cuales son evaluados a diferentes temperaturas, son ignorados:

$$i_{masw} - i_{ma} \approx (C_{pa} + wC_{pv})(T_w - T_a) + (w_{sw} - w)i_v$$

Ec.3.14.

O también,

$$T_w - T_a = \left[(i_{masw} - i_{ma}) - (w_{sw} - w)i_v \right] / C_{pma}$$

Ec.3.15.

Donde $C_{pma} = C_{pa} + wC_{pv}$

Sustituyendo las ecuaciones 3.9, 3.11. y 3.15. en la ecuación 3.6. y reagrupando obtenemos:

$$dQ = h_d \left[\frac{h}{C_{pma}h_d} (i_{masw} - i_{ma}) + \left(1 - \frac{h}{C_{pma}h_d} \right) i_v (w_{sw} - w) \right] dA$$

Ec.3.16.

Donde $h/(C_{pma} h_d) = Le_f$, es conocido como el factor de Lewis y es un indicativo de las cantidades relativas de calor y masa transferidos en un proceso evaporativo.



Considerando que la entalpía de transferencia debe ser igual al cambio de entalpía de la corriente de aire tenemos:

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{1}{m_a} \frac{dQ}{dz} = \frac{h_d}{m_a} \frac{dA}{dz} [Le_f(i_{masw} - i_{ma}) + (1 - Le_f)i_v(w_{sw} - w)]$$

Ec.3.17.

Para un modelo unidimensional del empaquetamiento de una torre de refrigeración, donde el área para la transferencia de masa y calor es la misma para cualquier sección horizontal del empaquetamiento, el área de transferencia para una sección de profundidad dz se expresa:

$$dA = a_{fi} A_{fr} dz$$

Ec.3.18.

En donde a_{fi} es el área mojada dividida por el volumen de empaquetamiento y A_{fr} es el área frontal.

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación 3.17.

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{m_a} [Le_f(i_{masw} - i_{ma}) + (1 - Le_f)i_v(w_{sw} - w)]$$

Ec.3.19.

Cuando la humedad ambiental es lo suficientemente elevada, el aire empieza a saturarse con el vapor de agua antes de que salga del empaquetamiento. En este caso las ecuaciones anteriores no sirven para describir el proceso evaporativo en el empaquetamiento. Puesto que la temperatura del aire saturado en la interfase es aun superior que la temperatura de la corriente de aire saturada, aun existirá transferencia de calor y masa. El exceso de vapor de agua transferido a la corriente libre de aire se condensará como niebla.

Supondremos que los coeficientes de transferencia de calor y de masa para la zona de niebla son iguales que para los del aire sin saturar, entonces el nivel de evaporación en la zona de niebla dependerá de la diferencia de humedad contenida en el aire saturado en la interfase, a la temperatura del agua, y de la humedad contenida en la corriente libre del aire, entonces:

$$\frac{dm_w}{dz} = h_d a_{fi} A_{fr} [w_{sw} - w_{sa}]$$

Ec.3.20.

En donde w_{sa} es la proporción de humedad del aire saturado a la temperatura T_a .



Dado que el exceso de vapor de agua se condensará, la entalpía del aire super-saturado se expresa así:

$$i_{ss} = C_{pa}T_a + w_{sa}(i_{fgwo} + C_{pv}T_a) + (w - w_{sa})C_{pw}T_a$$

Ec.3.21.

Procediendo de la misma forma que antes, pero con el aire sin saturar, tenemos que:

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{m_a} [Le_f(i_{masw} - i_{ss}) + (1 - Le_f)i_v(w_{sw} - w_{sa}) + Le_f(w - w_{sa})C_{pw}T_w]$$

Ec.3.22.

Si a las suposiciones iniciales, sumamos que Merkel asume que el factor de Lewis es igual a la unidad y que las pérdidas por evaporación son despreciables, tenemos que aplicándolas a las ecuaciones 3.19. y 3.6. las simplificamos:

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{m_a} (i_{masw} - i_{ma})$$

Ec.3.23.

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{m_a}{m_w} \frac{1}{C_{pw}} \frac{di_{ma}}{dz}$$

Ec.3.24.

Solo con las dos ecuaciones anteriores nos sería imposible conocer el estado del aire en la salida del empaquetamiento, ya que necesitamos dos propiedades para conocerlo. Por lo tanto, la temperatura del aire a la salida del empaquetamiento, esencial para calcular el flujo másico a través de una torre de tiro forzado, es desconocida. Merkel asume que el aire a la salida del empaquetamiento está saturado con vapor de agua, lo cual permite determinar la temperatura y densidad del aire y la ecuación de pérdidas. En muchos casos prácticos este supuesto alcanza resultados razonables.

Normalmente, las ecuaciones 3.23. y 3.24. son combinadas para formar una integración:

$$\frac{h_d A}{m_w} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr} L_{fi}}{m_w} = \frac{h_d a_{fi} L_{fi}}{G_w} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{C_{pw} dT_w}{(i_{masw} - i_{ma})} = Me$$

Ec.3.25.

Esta es conocida como ecuación de Merkel. El coeficiente adimensional $h_d a_{fi} L_{fi}/G_w$ es llamado número de Merkel. En la ecuación, L_{fi} es el espesor del empaquetamiento y $G_w = m_w/A_{frw}$



3.3. Método de eficiencia-NTU aplicado a sistemas evaporativos.

Esta aproximación del método de eficiencia-NTU a torres de refrigeración es útil en la configuración de flujo cruzado y simplifica el método de solución si se compara con procedimientos numéricos habituales.

Considerar la ecuación para la transferencia de entalpía en un proceso evaporativo dado por la ecuación 3.16, que puede ser escrita como:

$$dQ = h_d [Le_f(i_{masw} - i_{ma}) + (1 - Le_f)i_v(w_{sw} - w)] dA$$

Ec.3.26

Con la suposición de Merkel de que el factor de Lewis es igual a la unidad, la ecuación anterior se reduce a:

$$dQ = h_d(i_{masw} - i_{ma})dA$$

Ec.3.27

Donde $(i_{masw} - i_{ma})$ es el potencial de entalpía usado por el método de eficiencia-NTU en el caso de enfriamiento evaporativo.

Para el volumen de control mostrado en la figura 3.1, se deduce de las ecuaciones 3.17. y 3.24. que:

$$dQ = m_w C_{pw} dT_w = m_a di_{ma}$$

Ec.3.28.

Es conveniente relacionar dQ a la pendiente de la curva de la entalpía del aire saturado(i_{masw}) a la temperatura del agua(T_w). La ecuación anterior se escribe:

$$dQ = m_w C_{pw} di_{masw} / (di_{masw} / dT_w) = m_a di_{ma}$$

Ec.3.29.

De la cual se infiere que:

$$di_{masw} = dQ(di_{masw} / dT_w) / (m_w C_{pw})$$

Ec.3.30.



Se sigue de la ecuación 3.28. que $di_{ma}=dQ/m_a$. Restando esta relación de la ecuación 3.30 encontramos:

$$di_{masw} - di_{ma} = d(i_{masw} - i_{ma}) = dQ \left[(di_{masw} / dT_w) / (m_w C_{pw}) - 1 / m_a \right]$$

Ec.3.31.

De las ecuaciones 3.31. y 3.27. se deduce:

$$\frac{d(i_{masw} - i_{ma})}{(i_{masw} - i_{ma})} = h_d \left(\frac{(di_{masw} / dT_w)}{m_w C_{pw}} - \frac{1}{m_a} \right) dA$$

Ec.3.32.

Esta ecuación, aplicable a un sistema evaporativo, corresponderá con la usada en el diseño de intercambiadores de calor si se define la capacitancia del aire(fluido frío) como m_a y la capacitancia del agua(fluido caliente) como $m_w C_{pw} / (di_{masw} / dT_w)$.

La máxima cantidad teórica de entalpía que puede ser transferida es $Q_{max}=(\text{capacitancia mínima}) \times (i_{maswi} - i_{mai})$, donde i_{maswi} es la entalpía del aire saturado en condiciones del agua a la entrada e i_{mai} denota la entalpía del aire a la entrada.

Se consideran 2 posibles casos:

-Caso 1

$$m_w C_{pw} / (di_{masw} / dT_w) < m_a$$

Ec.3.33.

Donde, en consonancia con la terminología de diseño de intercambiadores de calor $C_{emin}=m_w C_{pw} / (di_{masw} / dT_w)$ y $C_{emax}=m_a$. La capacitancia evaporativa para este caso viene dada por:

$$C_e = C_{emin} / C_{emax} = m_w C_{pw} / [(di_{masw} / dT_w) m_a]$$

Ec.3.34.

Sustituyendo C_e en la ecuación 3.32 encontramos:

$$\frac{d(i_{masw} - i_{ma})}{(i_{masw} - i_{ma})} = \frac{h_d (di_{masw} / dT_w) (1 - C_e) dA}{m_w C_{pw}}$$

Ec.3.35.



Integrando la ecuación 3.35. entre los estados de entrada y salida del aire, i_{ai} y i_{ao} , obtendremos:

$$(i_{maswo} - i_{mai}) / (i_{maswi} - i_{mao}) = \exp[-NTU_e(1 - C_e)]$$

Ec.3.36.

En donde i_{maswo} e i_{maswi} se refieren a las entalpías del aire saturado a las temperaturas de entrada y salida del agua. La definición análoga para NTU en este sistema evaporativo particular o torre húmeda es:

$$NTU_e = h_d A (di_{masw} / dT_w) / (m_w C_{pw})$$

Ec.3.37.

Donde A es el área húmeda de transferencia total.

La efectividad del intercambio de calor se define como:

$$e_e = Q / Q_{max}$$

Ec.3.38.

Integrando la ecuación 3.28. entre las condiciones de entrada y salida obtenemos:

$$Q = m_w C_{pw} (T_{wi} - T_{wo}) = m_a (i_{mao} - i_{mai})$$

Ec.3.39.

La máxima diferencia en entalpías puede ser expresada aproximadamente como:

$$Q_{max} \approx m_w C_{pw} (i_{maswi} - i_{mai}) / (di_{masw} / dT_w) = m_a C_e (i_{maswi} - i_{mai})$$

Ec.3.40.

Donde el gradiente de la curva de la función entalpía-temperatura del aire saturado en el volumen de control es:

$$\frac{di_{masw}}{dT_w} \approx \frac{i_{maswi} - i_{maswo}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

Ec.3.41.

Se deduce de las ecuaciones 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41 que:

$$e_e = (i_{maswi} - i_{maswo}) / (i_{maswi} - i_{mai})$$

Ec.3.42.



Y de las ecuaciones 3.38, 3.39 y 3.40 que:

$$C_e e_e = (i_{mao} - i_{mai}) / (i_{maswi} - i_{mai})$$

Ec.3.43.

De las ecuaciones 3.42 y 3.43, se obtiene que:

$$(e_e - 1) / (e_e C_e - 1) = (i_{maswo} - i_{mai}) / (i_{maswi} - i_{mao})$$

Ec.3.44.

Operando las ecuaciones 3.36 y 3.44. se obtiene la ecuación de efectividad-NTU para una torre de refrigeración húmeda en flujo cruzado:

$$e_e = \frac{1 - \exp[-NTU_e(1 - C_e)]}{1 - C_e \exp[-NTU_e(1 - C_e)]}$$

Ec.3.45.

-Caso 2

$$m_a < m_w C_{pw} / (di_{masw} / dT_w)$$

Ec.3.46.

En este caso:

$$C_e = m_a(di_{masw} / dT_w) / (m_w C_{pw})$$

Ec.3.47.

Siguiendo un procedimiento similar al del caso 1, encontraremos de nuevo la efectividad dada por la ecuación 3.45.

El método de efectividad-NTU está sujeto a aproximaciones que linealizan la curva $i_{masw} - T_w$. La precisión del método puede ser incrementada rompiendo el diseño en un número de incrementos determinados.

Un método analítico para mejorar la aproximación $i_{masw} - T_w$ a una línea recta, se basa en el uso del parámetro λ dado por:

$$\lambda = (i_{maswo} + i_{maswi} - 2i_{masw}) / 4$$

Ec.3.48.

En donde i_{masw} denota entalpía del aire saturado a la temperatura media del agua $T_{wm} = (T_{wi} + T_{wo}) / 2$.



Este factor es usado para obtener un valor mas correcto para Q_{max} como sigue:

$$Q_{max} = C_{emin}(i_{maswi} - \lambda - i_{mai})$$

Ec.3.49.

3.4. Ventiladores y difusores

Diferentes tipos de ventiladores son usados en torres de refrigeración. Pueden ser de flujo axial, centrífugos, flujo mixto y flujo cruzado. Cuando elegimos un ventilador para una aplicación en concreto, los siguientes factores han de ser considerados:

- Coste
- Actuación (estabilidad de operación, facilidad de control, consumo de potencia, rango de flujo).
- Disposición mecánica(conveniencia de la instalación)
- Propiedades de auto lavado de de las palas.
- Emisión de ruido.

La operación efectiva de los ventiladores en un sistema puede verse influenciada por varios factores estructurales y dinámicos. Nos centraremos en los ventiladores de flujo axial por ser los más usados en torres de refrigeración.

Las palas de los ventiladores de flujo axial son construidas en aluminio extruido o fibra de vidrio. Por su naturaleza, las palas de aluminio extruido son siempre de anchura uniforme, mientras que las de fibra de vidrio pueden adoptar la forma deseada.

Uno de los criterios básicos para el diseño de palas es producir un flujo de aire lo mas uniforme posible sobre estas. Conforme nos movemos desde la punta de pala hacia el cubo, la velocidad tangencial decrece. Para producir un flujo de aire uniforme, la anchura de pala y el ángulo de giro sobre su eje deben aumentar. Los vectores velocidad en las secciones de entrada de la pala podrían revertirse. Este efecto se ve reducido en ventiladores diseñados con disco de sellado en el cubo. En la figura 3.2. se observan las características de operación dependiendo del tipo de pala usado.

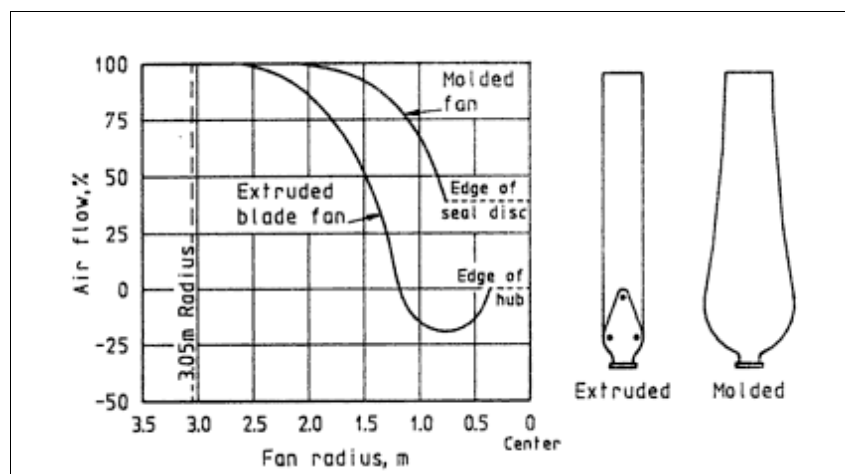


Fig.3.3. Distribución de flujo a través de un ventilador

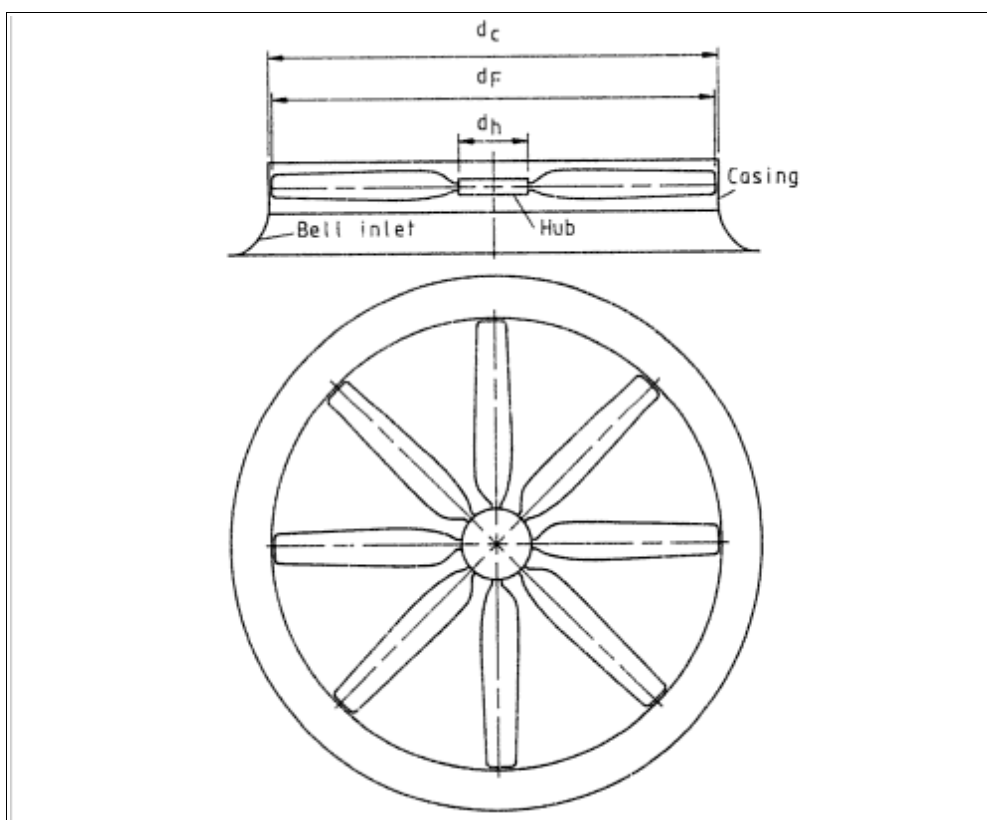


Fig. 3.4. Ventilador axial de ocho palas

Los ventiladores de flujo axial vienen de forma habitual provistos de 4 u 8 palas. Para ambos el coste y el volumen de aire suministrado a una velocidad de giro dada se incrementa conforme aumenta el número de palas. Para un flujo volumétrico de aire determinado, la velocidad de rotación se puede reducir si se aumenta el número de palas. Con esto se consigue disminuir el ruido e incrementar la eficiencia a la par que el coste.

Diámetro Ventilador axial	Número de palas
Hasta 14 ft.	4
16-20 ft.	6
24-30 ft.	8
36-40 ft.	8

Fig 3.5. Número de palas más habituales



Minimizando las pérdidas en el sistema e introduciendo ventiladores silenciosos, los niveles de ruido pueden ser reducidos de forma significativa. Un ejemplo de ventilador de bajo ruido se muestra en la figura 3.6.



Fig.3.6. Ventilador de bajo ruido

Pruebas en ventiladores

Las características de actuación de los ventiladores son determinadas en instalaciones de prueba, que deben cumplir con las especificaciones establecidas en muchos códigos o estándares. Para ventiladores de flujo axial, los estándares existentes son:

- ASME Test Code for Fans PTC 11-1946
- VDI-Richtlinien, Abname und Leistungsversuche an Ventilatoren, VDI 2044
- AMCA Standard 210-74
- ASHRAE Standard 51-75
- ASME PTC 1
- British Standard Institution BS 848
- Deutsches Institut für Normung DIN 24163 Teil 1 y 2

La organización internacional de estandarización (ISO) reconoce 4 tipos de instalaciones:

- Instalación Tipo A: entrada libre, salida libre



- Instalación Tipo B: entrada libre, salida en conducto
- Instalación Tipo C: entrada en conducto, salida libre
- Instalación Tipo A: entrada en conducto, salida en conducto

Entrada y salida libres significa que el aire entra o sale del ventilador directamente o desde la atmósfera. La instalación tipo A tiene una excepción, un tabique en el cual el ventilador es montado puede soportar una diferencia de presión entre la entrada y la salida. Salida o entrada conducidas significa que el aire entra o sale del ventilador a través de un conducto largo y recto de la misma sección y conecta directamente a la entrada/salida del ventilador.

Un ejemplo de la instalación tipo A se muestra en la figura 3.5. El flujo másico de aire que atraviesa el ventilador es determinado midiendo la presión en la pared de una boquilla venturi calibrada, situada en la entrada.

La expresión general para el flujo másico de aire que atraviesa este tipo de boquillas es:

$$m = C_n \varepsilon_n A_n (2 \rho_n \Delta p_n)^{0.5}$$

Ec.3.50.

En donde C_n = coeficiente de flujo

ε = factor de expansión

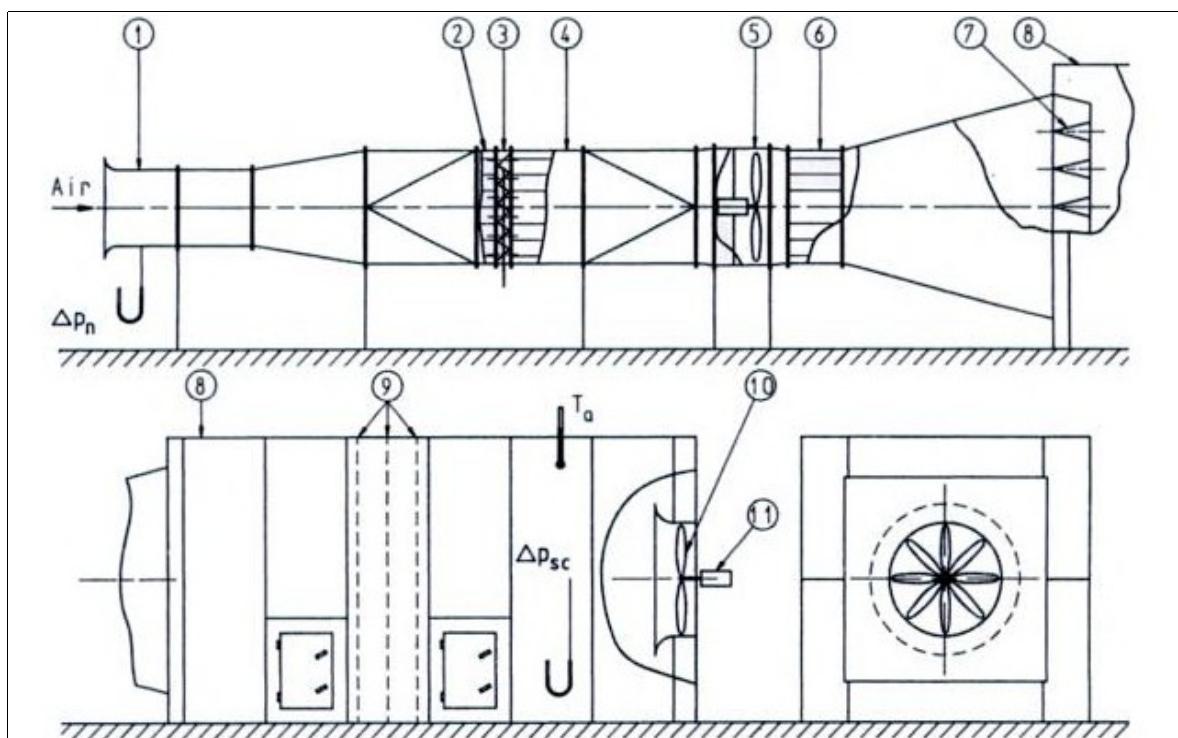


Fig. 3.7. Ejemplo de Instalación tipo A



Una rejilla regulable para control del flujo (3) es precedida y seguida por sistemas que eliminan los remolinos en el flujo(2) y (4). El ventilador auxiliar(5) es instalado para eliminar la resistencia del flujo bajo ciertas condiciones de operación. Cualquier remolino posterior al ventilador auxiliar es eliminado por el dispositivo(6).

Un serie de guías(7) aseguran una distribución de flujo relativamente uniforme en la cámara (8). Las pantallas (9) uniformizan aun mas el flujo. Los puntos de medida de presión estática y temperatura se localizan después de las pantallas para definir las condiciones en la entrada del ventilador. La presión estática diferencia, Δp_{sc} , es medida entre la superficie de la pared interior de la cámara y las condiciones ambiente.

La densidad del aire en la cámara, ρ_T (el subíndice T se refiere a test) puede ser determinada de la relación de los gases perfectos:

$$\rho_T = (p_a + \Delta p_{sc}) / RT_a$$

Ec.3.51.

Donde:

p_a =presión ambiente

T_a =temperatura ambiente

El flujo volumétrico de aire a través de la instalación de prueba es:

$$V_T = m / \rho_T$$

Ec.3.52.

Aunque la velocidad del aire en la cámara aguas arriba del ventilador es pequeña, no es necesariamente despreciable, y la presión dinámica asociada con ello se podría determinar de:

$$p_{dT} = 0.5(m / A_{sc})^2 / \rho_T$$

Ec.3.53.

Donde A_{SC} se refiere al área de la sección interior de la cámara inmediatamente anterior al ventilador.

El ventilador es montado en una carcasa apropiada a la salida de la cámara. Los detalles del tipo de embocadura de entrada al ventilador empleada durante la prueba debe ser especificada. Se debe tener cuidado para evitar la presencia de cualquier obstrucción que pudiera significar la modificación del flujo del aire inmediatamente antes o después del ventilador. El ventilador debería ser operado a una velocidad cercana a la especificada.



El par M_T en el eje, conocido como torque, y la velocidad de rotación N_T (r.p.m), son monitorizadas durante la prueba.

La potencia proporcionada al ventilador puede ser determinada con estos valores, acorde a:

$$P_{FT} = 2\pi M_T N_T / 60$$

Ec.3.54.

Para esta prueba, la presión estática en el ventilador es definida por:

$$\Delta p_{FST} = -\Delta p_{sc} - p_{dT}$$

Ec.3.55.

En algunos casos, puede ser preferible presentar las curvas características de presión en términos de la presión total del ventilador, la cual es definida como la diferencia en la presión total entre entrada y salida del ventilador:

$$\Delta p_{FIT} = \Delta p_{FST} + (m / A_c)^2 / (2\rho_T)$$

Ec.3.56.

Donde A_c = el área a la salida de la carcasa, sin quitar el carenado de motores u otras obstrucciones.

Presentación de datos y resultados

Puesto que resulta imposible realizar pruebas a ventiladores a la velocidad exacta de rotación o densidad especificada, se aplican reglas de conversión denominadas leyes de los ventiladores.

Flujo volumétrico;

$$\frac{V}{V_T} = \frac{N}{N_T}$$

Ec.3.57.

Presión;

$$\frac{\Delta p_{Fi}}{\Delta p_{FiT}} = \frac{\Delta p_{Fs}}{\Delta p_{FsT}} = \frac{p_{Fd}}{p_{FdT}} = \left(\frac{N}{N_T} \right)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_T} \right)$$

Ec.3.58.



Potencia;

$$\frac{P_F}{P_{FT}} = \left(\frac{N}{N_T} \right)^3 \left(\frac{\rho}{\rho_T} \right)$$

Ec.3.59.

Rendimiento;

$$\eta_{Fi} = \eta_{FiT} \text{ y } \eta_{Fs} = \eta_{FsT}$$

Ec.3.60.

Los resultados reales de los ensayos, o los resultados después de las conversiones acorde a las reglas explicadas, pueden ser dibujadas como series de puntos de test, contra el flujo volumétrico de aire entrante. Las velocidades de rotación se refieren a la velocidad especificada, N , y las densidades se refieren a densidades especificadas, ρ , que suelen ser 1 kg/m^3 o $1,2 \text{ kg/m}^3$.

La figura 3.8. muestra un ejemplo de curva característica de presión estática de un ventilador de 8 palas, flujo axial, con un diámetro de carcasa de 1542 mm.

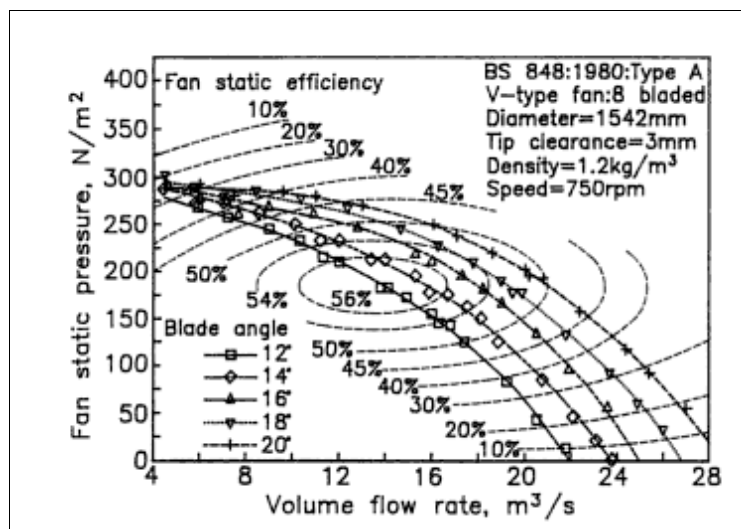


Fig.3.8. Curvas de presión y eficiencia



Las correspondientes potencia y eficiencia estática se muestran en las figuras 3.9 y 3.10.

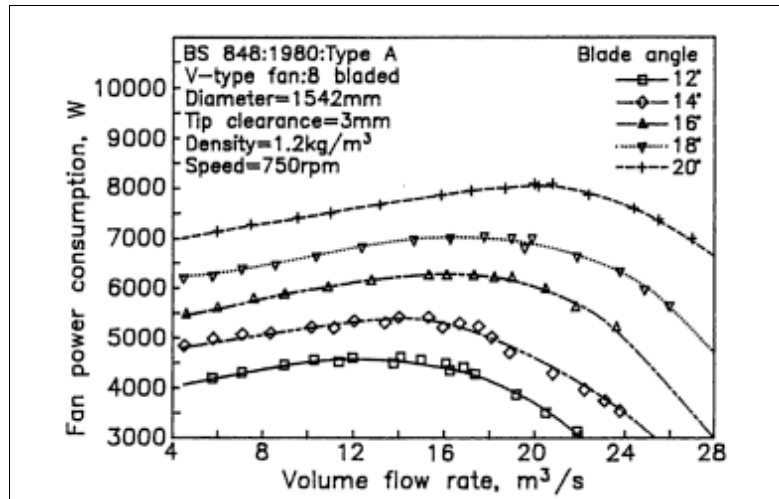


Fig.3.9. Curvas de potencia

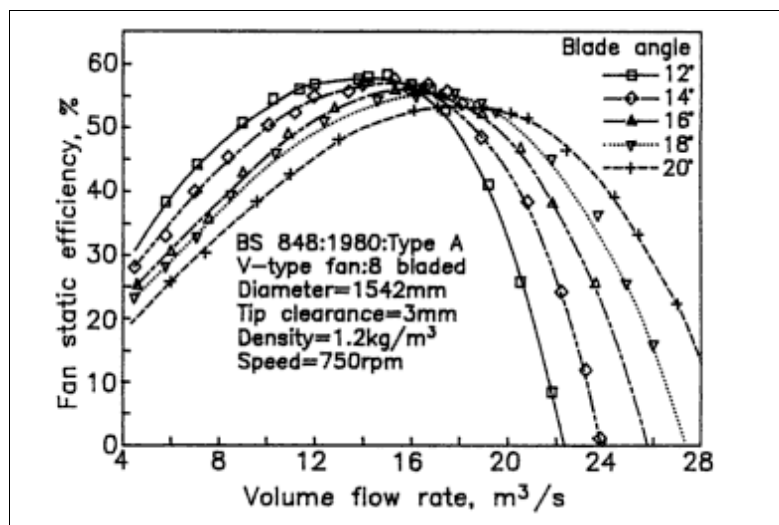


Fig.3.10. Curva de eficiencia estática



Holgura entre extremo de pala y carcasa

Un incremento en la holgura entre la pala del ventilador y la carcasa o camisa, referida como S_F , resulta en una reducción del rendimiento del ventilador.

Esto es debido, de forma principal, a la fuga de aire desde la zona de mas presión en la salida del ventilador hacia la zona de menor presión en la entrada, alrededor de las puntas de las palas. En sistemas prácticos, una diferencia recomendada entre el diámetro de la carcasa y el diámetro del ventilador es de 0,5 a 1,0 % del diámetro del ventilador, esto es:

$$S_F / d_F \approx S_F / d_c = (d_c - d_F) / (2d_c) = 0.005 \text{ a } 0.01$$

Ec.3.61.

En la industria petroquímica, acorde al estándar API-661, se recomienda una holgura radial del 0,5% del diámetro del ventilador o 19 mm entre la punta de pala y la carcasa, el que sea menor.

El coeficiente de pérdida en el rendimiento del ventilador debido a la holgura entre el extremo de la pala y la carcasa se puede expresar como:

$$Perdidas \text{ Rto.} = 2 \left(\frac{\text{holgura}}{\text{long.pala}} - 0.01 \right)$$

Ec.3.62.

La figura 3.11. muestra el efecto del incremento de la holgura entre punta de pala y la carcasa en la presión estática para un ventilador tipo V. La presión y el flujo volumétrico del ventilador decrecen linealmente cuando se incrementa la holgura entre la punta de pala y la carcasa. Esto es cierto en la región de rendimiento máximo si el coeficiente de pérdidas en el sistema es esencialmente constante a lo largo del rango de operación.

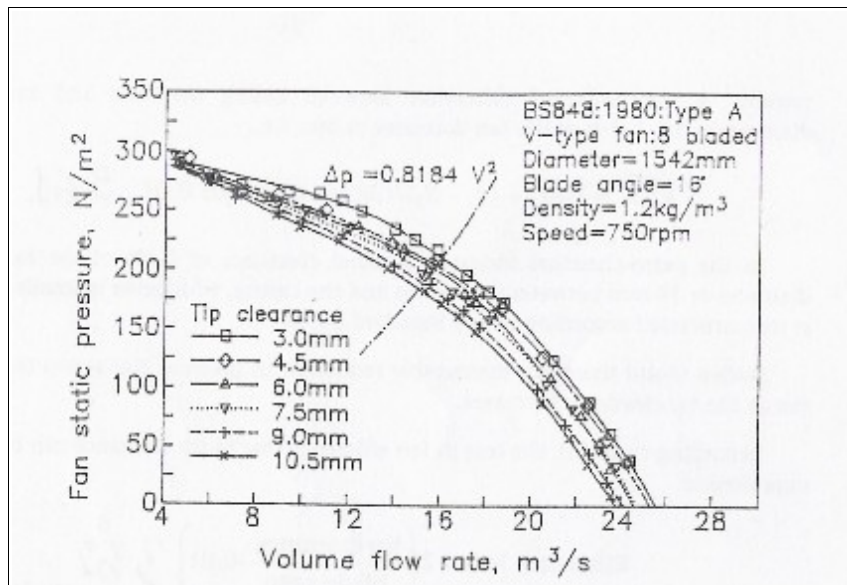


Fig.3.11.Efecto de la holgura en la presión

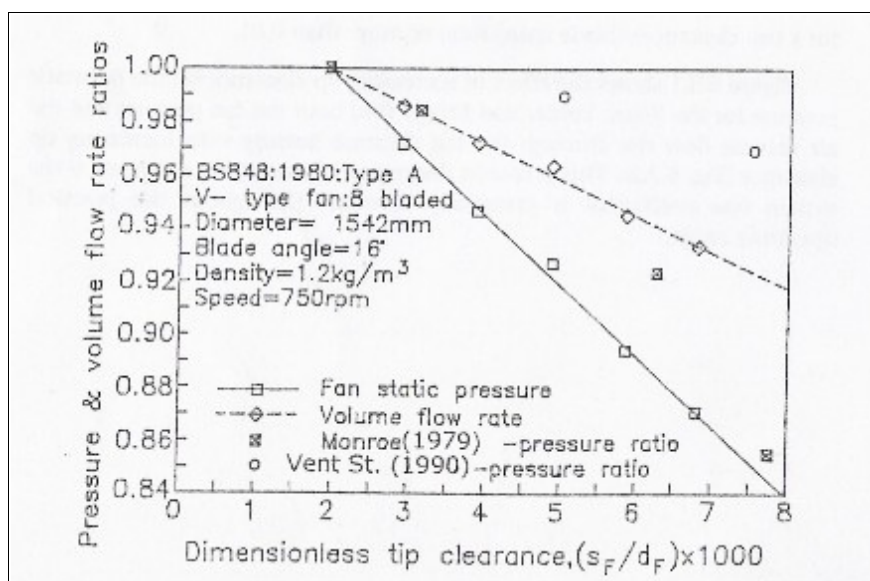


Fig.3.12.Efecto de la holgura en el rendimiento.



Pérdidas en el ventilador, obstáculos aguas arriba y aguas abajo.

En este apartado veremos cuales son las diferentes resistencias al flujo de aire que encontramos en el sistema ventilador. Estas resistencias incluyen estructuras de soporte, pantallas y pasarelas. Las figuras 3.13. y 3.14. muestran los coeficientes de pérdidas basados en la velocidad a través del ventilador para resistencias creadas por obstáculos localizados aguas arriba, o en la succión, y aguas abajo, o impulsión.

Estos coeficientes son función del área proyectada del obstáculo, A_{ob} , y la distancia x , de este desde el ventilador.

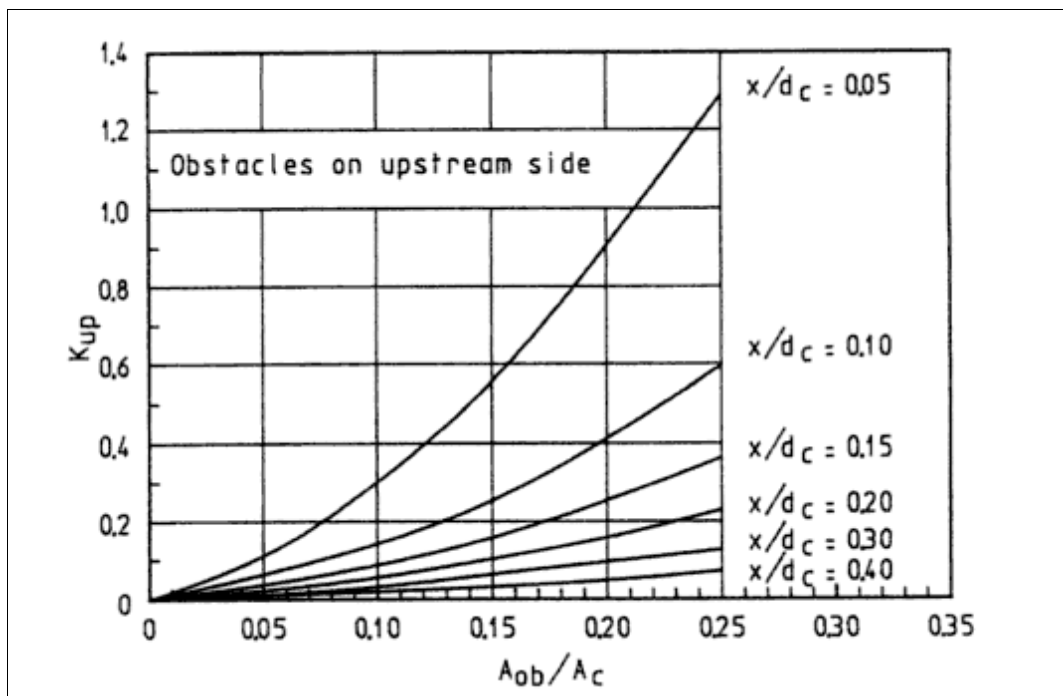


Fig.3.13.Pérdidas en la succión

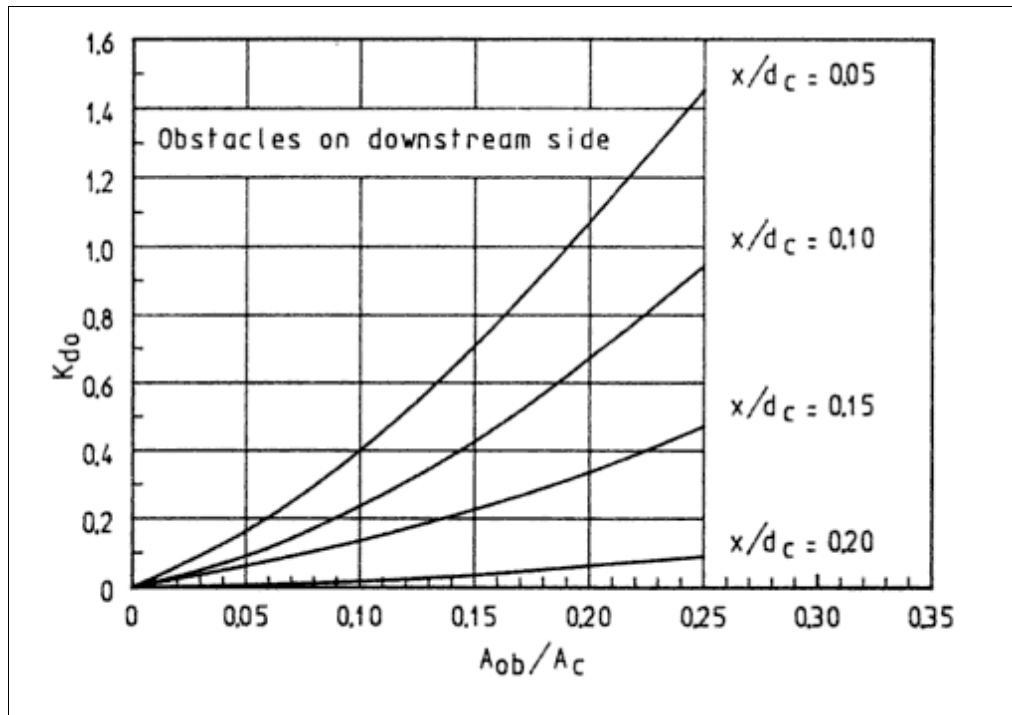


Fig.3.14. Pérdidas en la impulsión

El coeficiente de pérdidas corriente arriba, puede ser expresado como:

$$K_{up} = 2\Delta p_{up} / (\rho v^2) = 2\rho \Delta p_{up} / (m_a / A_e)^2 = f(x/d_c, A_{ob}/A_c)$$

Ec.3.63.

Donde:

$A_e = A_c - A_h$ es el área efectiva

A_c = área de la sección de la carcasa

A_h = área de la sección del cubo

De igual forma, el coeficiente de pérdidas corriente abajo, se expresaría:

$$K_{do} = 2\Delta p_{do} / (\rho v^2) = 2\rho \Delta p_{do} / (m_a / A_e)^2 = f(x/d_c, A_{ob}/A_c)$$

Ec.3.64.

Pérdidas en la embocadura de entrada.

Una embocadura de entrada de aire tipo *Bell-mouth* o acampanada, asegura un buen rendimiento del ventilador. Aunque otras embocaduras menos costosas son usadas en una variedad de aplicaciones, generalmente reducen el rendimiento.

Ejemplos de diferentes embocaduras de entradas con sus pérdidas correspondientes, K_{Fsi} , se muestran en la figura 3.15.

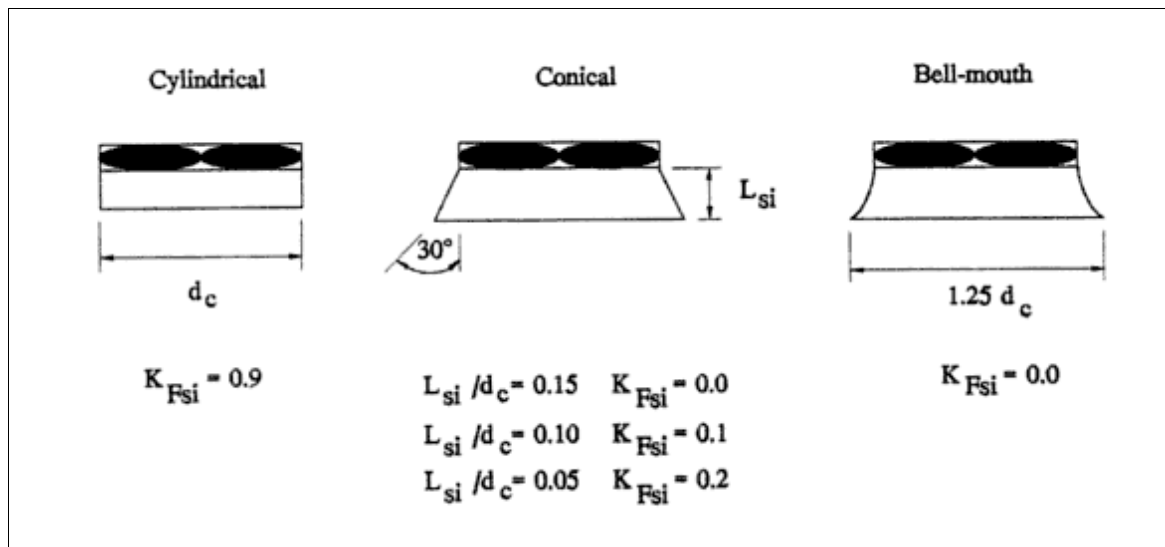


Fig.3.15. Tipos de embocaduras de entrada

En aplicaciones industriales que usan embocaduras cónicas o cilíndricas, el flujo de aire es alrededor del 3-5% menor que en una embocadura *Bell-mouth*.

Difusores

Instalando un difusor aguas abajo de la corriente de aire de un ventilador de flujo axial, la velocidad del aire y la correspondiente energía cinética se reducen, y por lo tanto su presión estática se incrementa. El resultado es una menor potencia consumida por el ventilador.

De manera ideal, en ausencia de pérdidas, la presión total permanece constante, esto es:

$$p_{2id} + \rho v_2^2 / 2 = p_1 + \rho v_1^2 / 2$$

Ec.3.65.

Donde el subíndice 1 hace referencia a la entrada al difusor y 2 indica la salida del difusor



La recuperación de presión es:

$$p_{2id} - p_1 = \rho (v_1^2 - v_2^2) / 2 = \rho v_1^2 (1 - \sigma_{12}^2) / 2$$

Ec.3.66

Donde:

$\sigma_{12} = A_1/A_2$
id=condiciones ideales

En difusores prácticos, solo una parte de esta recuperación de presión es posible, y la eficiencia del difusor es definida como:

$$\eta_{dif} = \frac{p_2 - p_1}{p_{2id} - p_1} = \frac{p_2 - p_1}{\rho v_1^2 (1 - \sigma_{12}^2) / 2}$$

Ec.3.67.

La eficiencia de los difusores alcanza picos de 0,9.

El coeficiente de pérdidas de un difusor con flujo uniforme en entrada y salida es:

$$K_{dif} = \frac{p_{t1} - p_{t2}}{\rho v_1^2 / 2} = \frac{(p_1 + \rho v_1^2 / 2) - (p_2 + \rho v_2^2 / 2)}{\rho v_1^2 / 2}$$

Ec.3.68.

Sustituyendo la ecuación 3.67. en la ecuación 3.68. encontramos:

$$K_{dif} = (1 - \eta_{dif})(1 - \sigma_{12}^2)$$

Ec.3.69.



El ángulo de un difusor usado en la práctica esta en el rango $12^\circ < 2\theta < 17^\circ$. Un ejemplo de tal difusor se muestra en la figura siguiente.

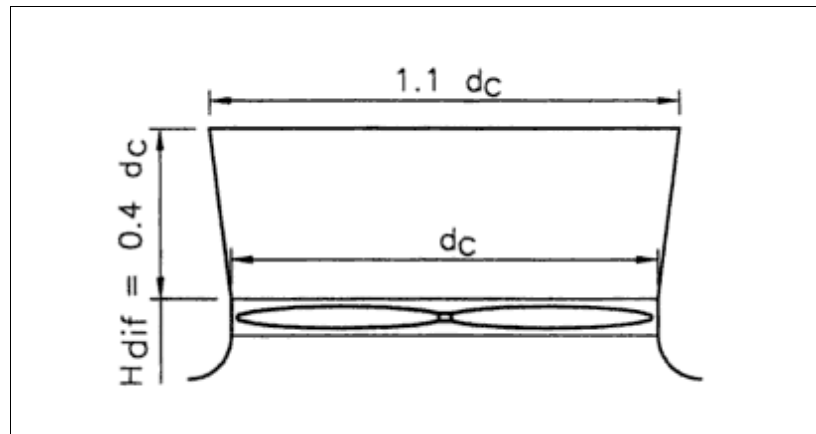


Fig. 3.16.Difusor Práctico

Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería con condiciones de flujo simétrico en la entrada, se recomienda el uso de una eficiencia de $\eta_{dif} = 0,8$.

El valor de σ_{12} se hallará en función de las dimensiones del difusor práctico:

$$\sigma_{12} = A_e / A_s = \frac{D_c^2}{1.1^2 D_c^2} = 0.83$$

Ec.3.70.

Donde A_e es el área entrada del difusor y A_s el área de salida.

Siempre que sea posible el ventilador debería ser probado junto con el difusor con el objetivo de proporcionar curvas de actuación que puedan usarse para propósitos de diseño.



3.5. Empaquetamientos

Aunque los empaquetamientos de las torres suelen ser referidos como superficies de transferencia de calor, esta terminología no es cierta en un sentido estricto. La superficie de transferencia de calor, como vimos en la exposición teórica, es la propia superficie del agua. Por lo tanto, el empaquetamiento es un medio por el cual una mayor cantidad de área de agua se expone a la corriente de aire, incrementando la cantidad de calor transferido. Así mismo, mediante el uso del empaquetamiento se incrementa el tiempo del contacto aire-agua retardando el progreso del agua, incrementado con esto también la cantidad de calor transferido.

Los materiales usados para su fabricación han sido desarrollados desde cañas de bambú hasta los modernos plásticos moldeados por inyección.

Los empaquetamientos deben ser estructuralmente fuertes, químicamente inactivos, resistentes al fuego, resistentes al impacto y erosión, y tener un bajo nivel de resistencia al flujo de aire.



Fig.3.17.Ejemplo de empaquetamiento

Algunos ejemplos de empaquetamientos se muestran en la figura 3.18. El PVC puede ser usado como material de relleno por encima de una temperatura del agua de 50°C, CPVC por encima de 65°C, mientras que temperaturas mayores requieren materiales como polipropileno o acero inoxidable.

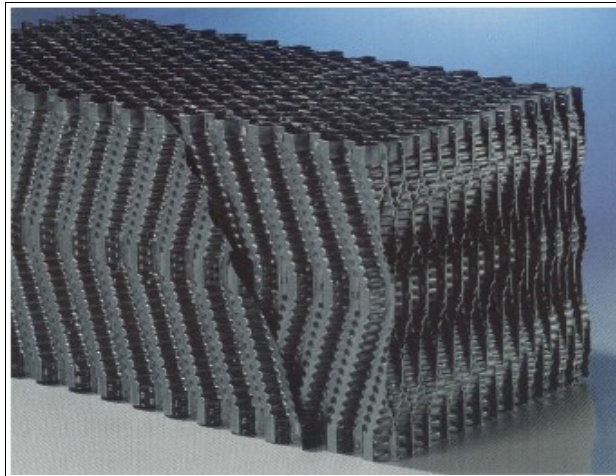
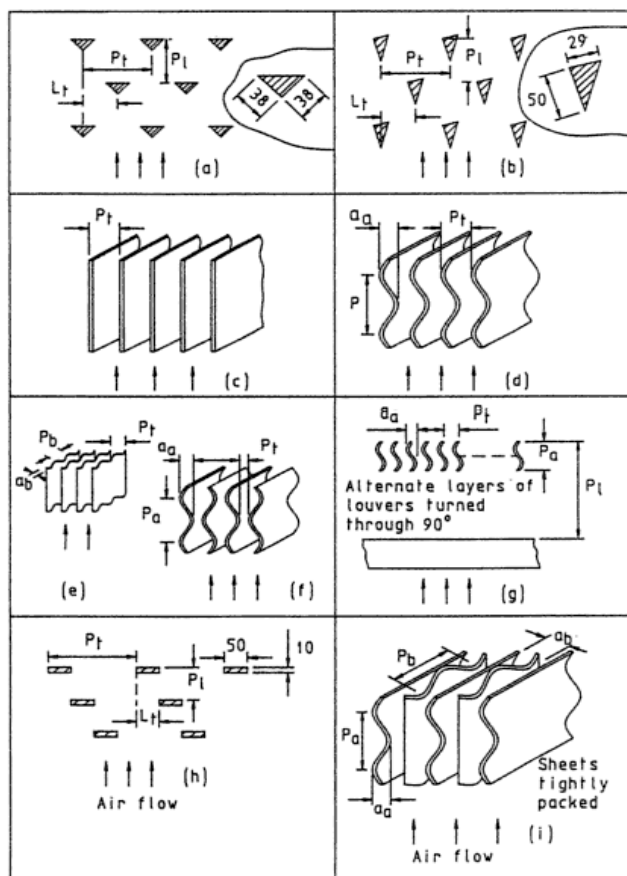


Fig.3.18. Empaquetamiento de Polipropileno

Fig.3.19. (a) (b) y (h) empaquetamientos tipo *splash*,
(c) (d) (e) (f) (g) e (i) tipo *film*



En algunas aplicaciones, los materiales reciclables son de uso preferente. Muchas de las deficiencias de los empaquetamientos plásticos pueden ser evitadas empleando empaquetamientos de acero inoxidable, un ejemplo de esto se muestra en la siguiente figura.

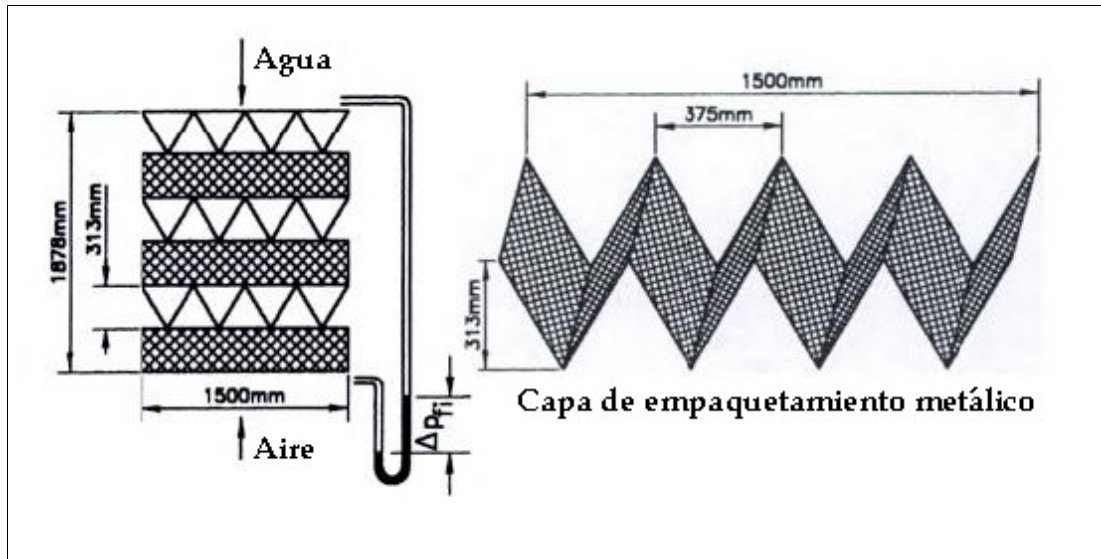


Fig.3.20. Empaquetamiento metálico

Tipos genéricos de empaquetamiento

-Tipo *Splash*: En este tipo de empaquetamiento el agua cae en forma de cascada a lo largo de sucesivas elevaciones de capas paralelas de empaquetamiento, colisionando las gotas con cada una de las capas y formándose gotas nuevas. Como consecuencia, la superficie del agua expuesta al enfriamiento producido por la corriente aire se incrementa a la vez que la cantidad de calor transferida al aire en los alrededores por conducción, convección, radiación y evaporación.

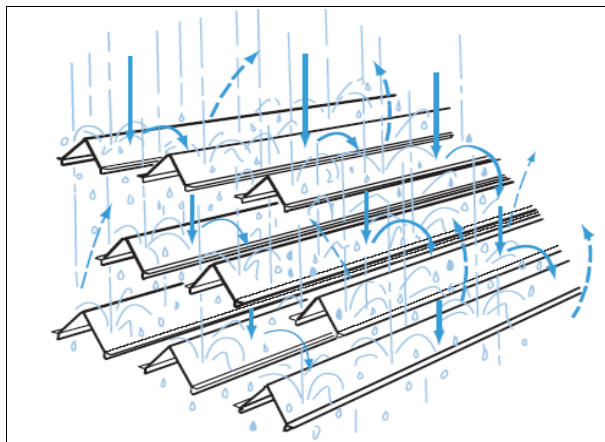


Fig.3.21. Concepto de empaquetamiento *splash*



Como beneficio adicional, el tiempo de retención del agua que desciende a través de la torre es prolongado, extendiendo el periodo durante el cual el agua es expuesto al aire refrigerante. La desventaja de este tipo de empaquetamiento es, por su propia naturaleza, que se requiere un gran volumen para romper el flujo de agua, lo cual implica la necesidad de torres mas grandes. Las barras usadas se disponen en capas separadas una distancia de 200 a 600 mm, lo que resulta en alturas de empaquetamiento de 5 a 8 m.

El rendimiento de este empaquetamiento depende en gran medida de su capacidad para formar gotas. Su rendimiento también depende de su propia resistencia al flujo de aire, y en menor grado al uso económico del material.

-*Trickle Pack*: Este empaquetamiento es mucho más fino que el tipo *splash* y es de plástico o metal. Reduce bastante la salpicadura y se han introducido en años recientes por su menor tamaño respecto al tipo anterior. Por ser más fino que el tipo *splash*, se ocluye más fácilmente y otorga una mayor presión a las gotas.

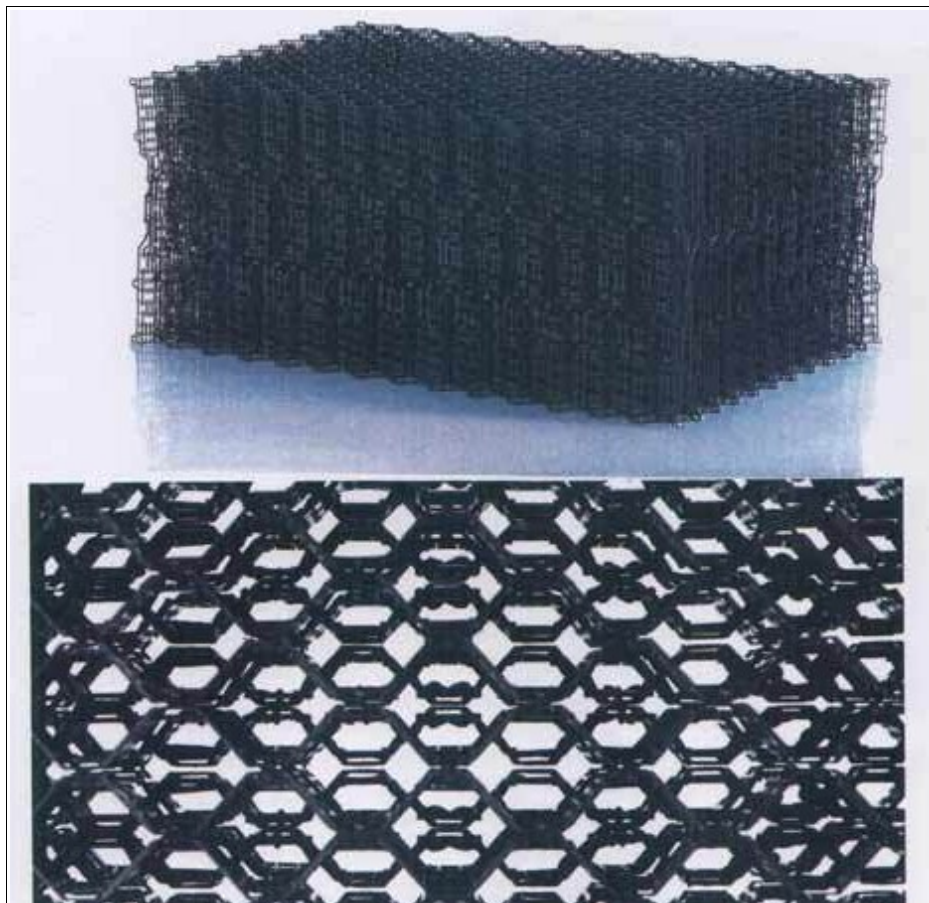


Fig.3.22. Empaquetamiento *trickle*



-*Film*: Aunque el propósito es producir una gran superficie de agua, este empaquetamiento es diferente del tipo *splash* porque esto se consigue permitiendo que el agua se extienda formando una fina capa, en lugar de formando gotas. Esto reduce el problema del arrastre de las gotas por la corriente de aire y por lo tanto permite mayores velocidades de entrada de aire.

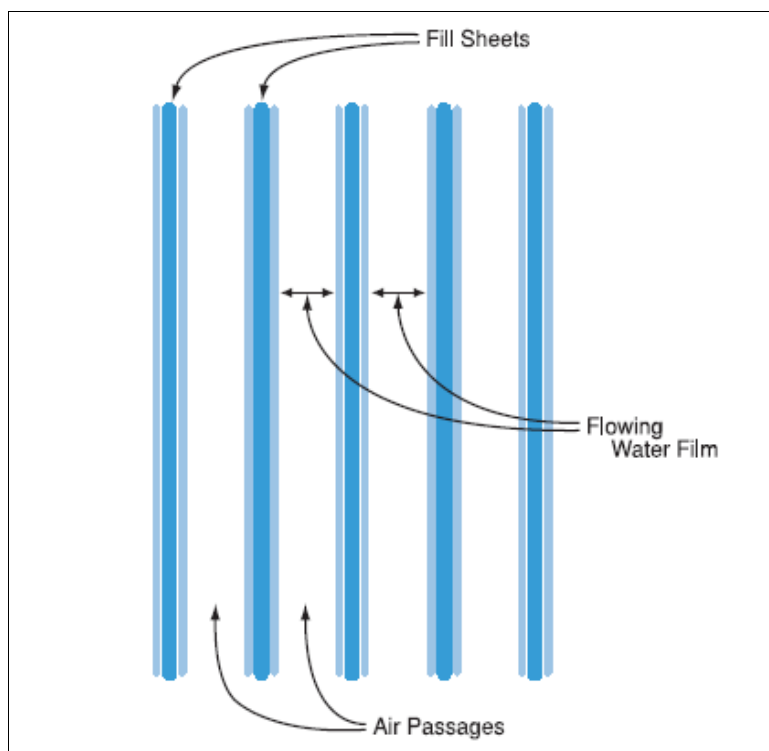


Fig.3.23. Concepto de empaquetamiento *film*

Aproximadamente la mitad de los empaquetamientos usados en torres de flujo cruzado, y prácticamente todos los que son usados en contra flujo, son empaquetamientos de este tipo.

-*Extended film fill*. Evolución de los empaquetamientos *film*, en donde los plásticos de nueva generación han sustituido a los antiguos materiales. El diseño se varió y se bajó el peso aumentando la fuerza estructural y el ciclo de vida.

Los problemas de distribución de agua y aire se han disminuido por la evolución del diseño, al haber incluido canales que conectan las capas entre sí.

Casi todos los fabricantes tienen sus propios catálogos, donde se detallan las características y capacidades de todos sus productos, pero existen discrepancias para resultados obtenidos en una instalación respecto a otra de características análogas.



Esto se debe a varias causas:

- Distorsiones en los flujos.
- Diferentes temperaturas y presiones en los ensayos.
- Cambios en la humedad en empaquetamientos.
- Errores de media.

En los grandes y modernos centros de ensayo, la sección del empaquetamiento debe tener dimensiones hasta 7x7 m para contra flujo y 5x10 m para flujo cruzado y la mayoría de las discrepancias antes mencionados se pueden reducir de forma considerable.

Cuando se usa el método de Merkel, es conveniente presentar las pérdidas de presión por metro de espesor de empaquetamiento, esto es:

$$h_d a_{fi} A_{fi} / m_w = h_d a_{fi} / G_w = a_d (G_w / G_a)^{-bd}$$

Ec.3.71.

$$K_{fi1} = a_p (G_w / G_a) + b_p$$

Ec.3.72.

Donde $G_w = m_w / A_{frw}$, $G_a = m_a / A_{fra}$ y a_d , b_d , a_p y b_p son obtenidas de forma experimental.

Otra forma para aproximar las ecuaciones anteriores de una forma empírica es como sigue:

$$h_d a_{fi} / G_w = a_d G_w^{bd} G_a^{cd}$$

Ec.3.73.

$$h_d a_{fi} / G_w = a_d (G_w / G_a)^{-bd} L_{fi}^{cd}$$

Ec.3.74.

$$K_{fi1} = a_p G_w^{bpa} G_a^{bpb}$$

Ec.3.75.



En la siguiente tabla se muestran valores obtenidos para los cuatro coeficientes anteriores para varios empaquetamientos:

$$\text{Mass transfer per meter of fill height, } h_d a_{\text{eff}} / G_w = \frac{h_d a_{\text{eff}} (\text{ATD} \times \text{width})}{n_w} = a_d (G_w / G_a)^{-b_d}$$

$$\text{Loss coefficient per meter of air travel distance (ATD) in fill } K_{\text{eff}} = a_p G_w^{b_{pa}} G_a^{b_{pb}}$$

Fig. 4.3.3	Description, spacing [mm]	Airflow orientation	Fill configuration	Size(s) tested, HxWxATD [m]	a_d	b_d	a_p	b_{pa}	b_{pb}
a	Doron V-bar, 101.6x203.2	Parallel	Staggered	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.268	0.56	0.751	0.66	-0.73
a	Doron V-bar, 203.2x203.2	Parallel	In-line	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.239	0.38	0.985	0.72	-0.82
b	Ecdyne T-bar, 101.6x203.2	Parallel	Staggered	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.263	0.34	0.112	1.30	-0.22
b	Ecdyne T-bar, 203.2x203.2	Parallel	In-line	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.245	0.35	0.206	0.89	-0.069
c	Wood lath, 101.6x101.6	Parallel	Staggered	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.274	0.45	1.437	0.76	-0.80
c	Wood lath, 101.6x101.6	Perpendicular	Staggered	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.358	0.57	1.828	0.71	-0.59
d	Marley Alpha-bar, 101.6x406.4	Perpendicular	Staggered	3.658x2.438x1.829 3.658x2.438x2.438	0.307	0.052	1.816	0.71	-0.85

Fig.3.24.Datos para empaquetamientos de flujo cruzado(Teoría de Merkel)

3.6. Eliminadores de gotas.

En torres de refrigeración húmeda, la niebla creada a la salida del empaquetamiento, consiste en aire casi saturado donde circulan minúsculas gotas de agua. Estas gotas contienen impurezas químicas o de otros tipos que pueden contaminar el ambiente. Cuando la corriente de aire choca con el eliminador, sufre un brusco cambio de dirección que provoca que se condense el agua que contiene. Este agua es recogida para su tratamiento y reutilización en el sistema, aunque no toda es recuperada, perdiéndose una parte de ella en la atmósfera.

Los eliminadores han evolucionado desde los primeros listones de madera de paso simple y paso múltiple a formas sinusoidales. Estos fueron seguidos por combinaciones de formas sinusoidales y formas de panel. Actualmente encontramos los tipos celulares, compuestos por diversas hojas separadas por espaciadores, contruidos a partir de hojas termo-formadas de PVC.

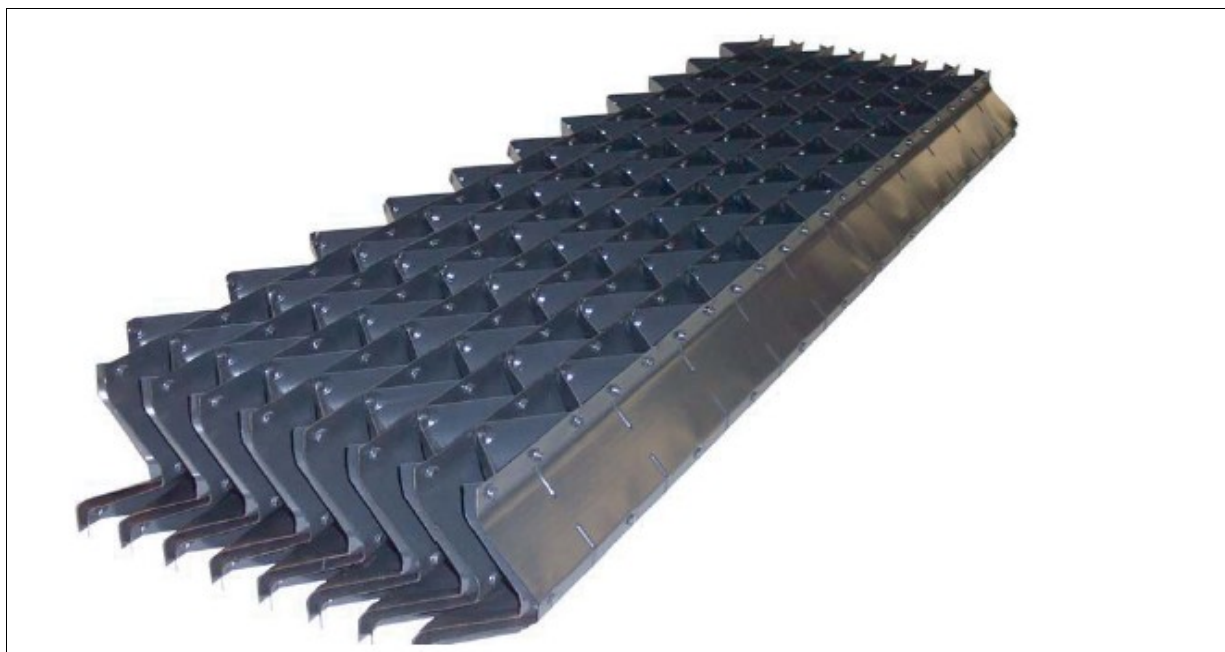


Fig.3.25.Eliminador de gotas de tipo celular

El diseño de estos eliminadores se mide por 2 criterios:

- Capacidad para atrapar gotas
- Pérdida de presión que provocan

Becker y Burdick han investigado las características de los tipos de eliminadores comerciales para torres en configuración de flujo cruzado (tipos T y Z).



Ellos subrayan la importancia de considerar, no solo las pérdidas de presión (Fig.3.26) sino también la interacción de los eliminadores con el flujo a través del sistema completo. Esto es especialmente importante cuando estamos hablando de torres de tiro mecánico, ya que el flujo cerca de la entrada del ventilador se ve afectado. A continuación se muestra la gráfica comparativa entre los tipos citados anteriormente.

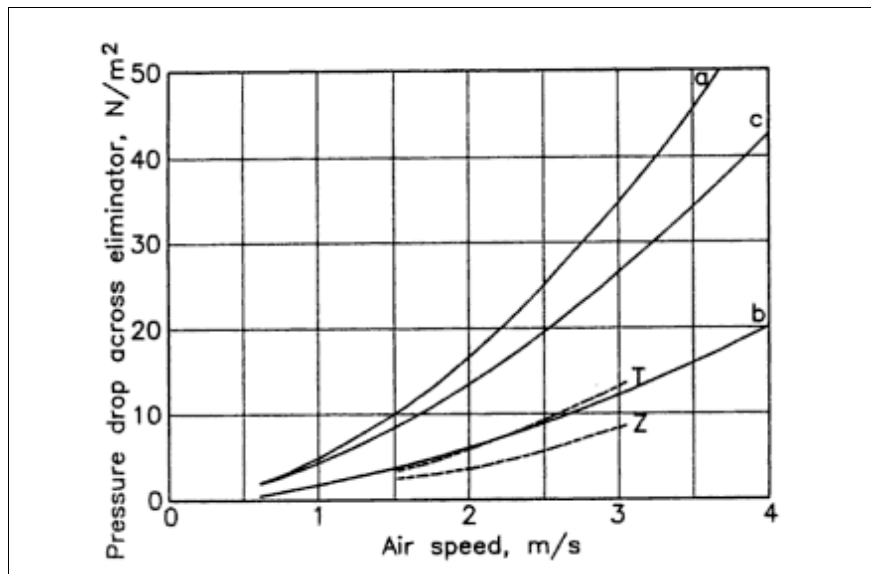


Fig.3.26. Comparación de pérdidas de carga

Donde a, b y c son tres tipos de eliminadores disponibles comercialmente. La pérdida de presión se suele presentar también en términos del coeficiente de pérdidas, como en la siguiente figura:

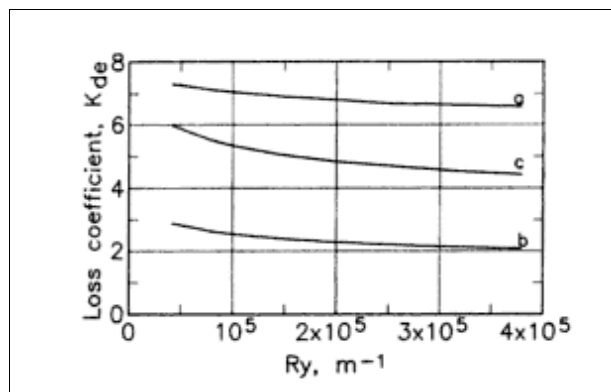


Fig.3.27. Coeficiente de pérdidas

El coeficiente de pérdidas en el eliminador de gotas puede ser expresado analíticamente mediante la expresión:

$$K_{de} = a_{de} R_y^{b_{de}}$$

Ec.3.76.



Donde a_{de} y b_{de} son constantes diferentes para cada tipo de eliminador.

Para el eliminador de gotas tipo c, K_{de} puede ser expresado como:

$$K_{de} = 27.4892 R_y^{-0.14247}$$

Ec.3.77.

Para la misma velocidad de aire, la pérdida de presión puede variar significativamente para diferentes tipos de eliminadores. Ciertos eliminadores teniendo una resistencia al aire mayor son mas efectivos que aquellos de menor resistencia, sin embargo este no es siempre así. El rendimiento de un eliminador está determinado por su capacidad para recoger agua del aire saturado. Como máximo los eliminadores recogen alrededor del 0,01% del flujo de agua que usa la torre de refrigeración.

Los eliminadores de gotas son más efectivos a velocidades entre 2 y 4 m/s. A velocidades superiores es posible que demasiado agua se acumule, lo que incrementaría las pérdidas a través del eliminador.



Capítulo 4. Método de cálculo



4.1. Introducción

En este capítulo se explica el método desarrollado para el cálculo del comportamiento de una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado. Para ello, se dispone de unos datos de partida (condiciones del aire y agua en sus respectivas entradas a la torre, geometría de la torre, características del empaquetamiento y eliminadores, tipo de ventilador usado).

Se establecen una serie de puntos a lo largo del recorrido del flujo másico de aire por la torre, que serán los puntos de estudio que servirán para calcular todas las resistencias al flujo másico de aire. Con ayuda de la curva de pérdida de carga del ventilador se calcula el flujo másico de aire que atraviesa la torre y mediante el método de eficiencia-NTU el calor intercambiado.

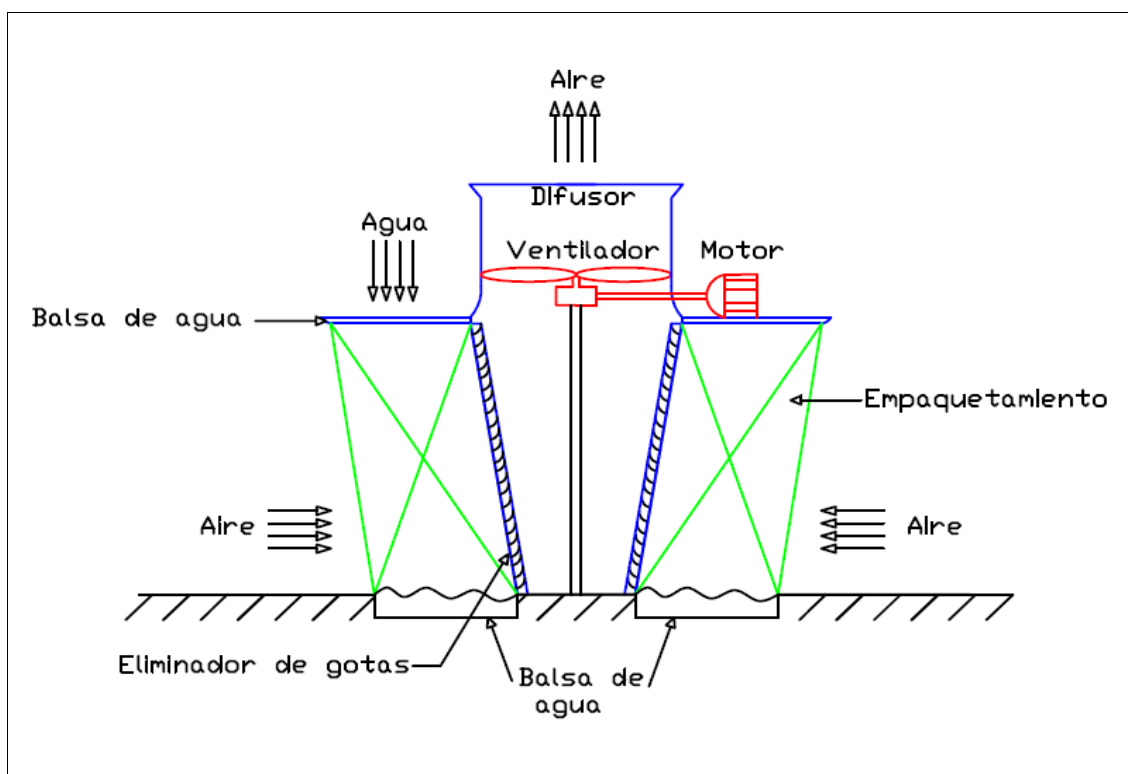


Fig.4.1.Esquema de una torre de tiro inducido y flujo cruzado



4.2. Datos de Partida

A continuación veremos cada uno de los valores a partir de los cuales se desarrolla el método de cálculo del comportamiento. Estos serán las características y dimensiones de los elementos que componen la torre de refrigeración húmeda de tiro inducido a contra flujo, así como las propiedades y magnitudes características de los dos fluidos involucrados en la transferencia de calor.

Datos de la geometría de la torre:

- H3**, altura del empaquetamiento con respecto al suelo (m)
- H6**, altura de instalación de las palas del ventilador respecto al suelo (m)
- H7**, altura respecto al suelo de salida del difusor (m)
- ATD**, (*air travel distance*) profundidad del empaquetamiento (m)
- W3**, ancho de entrada del empaquetamiento (m)

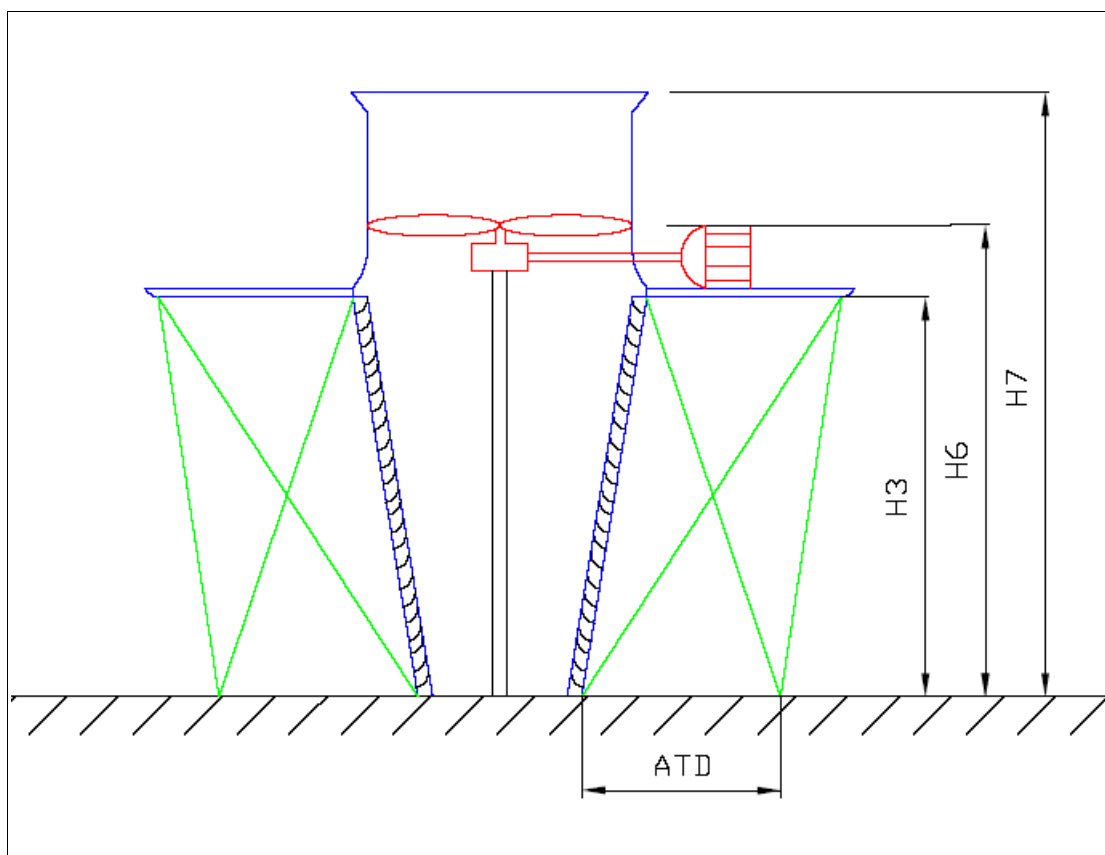


Fig.4.2.Datos de la geometría de la torre

**Datos del empaquetamiento:**

Respecto al empaquetamiento, dependiendo del tipo que elijamos, la transferencia de masa y las pérdidas de presión provocadas cambiarán para una misma geometría de torre.

Como hemos visto en capítulos anteriores, hay catálogos donde han sido caracterizados varios tipos de empaquetamiento. Según se elija un tipo de empaquetamiento u otro, los siguientes cuatro coeficientes cambiarán de valor:

- a_d , para la transferencia de masa
- b_d , para la transferencia de masa
- a_p , para la pérdida de presión
- b_{pa} , para la pérdida de presión.
- b_{pb} , para la pérdida de presión.

Datos del agua a la entrada:

- m_w , caudal másico de agua (kg/s).
- T_{wi} , temperatura del agua a la entrada (K).

Datos del aire a la entrada:

- T_{a1} , temperatura del aire a la entrada (K).
- T_{wb} , temperatura de bulbo húmedo (K).
- P_{a1} , presión atmosférica en la entrada, medida en H3/2.

Datos del ventilador y difusor:

- D_f , diámetro del ventilador (m)
- D_c , diámetro de la carcasa (m)
- N_f , velocidad de rotación del ventilador (r.p.m)
- H_{dif} , altura del difusor (m)
- ρ_t , densidad de test del ventilador (kg/m³)
- N_{ft} , velocidad de rotación del ventilador en test (r.p.m)
- Curvas de ensayo ΔP - m_a**



4.3. Inicio del método

En primer lugar establecemos una serie de puntos de estudio para el flujo másico de aire, que serán los que se indican en la figura siguiente:

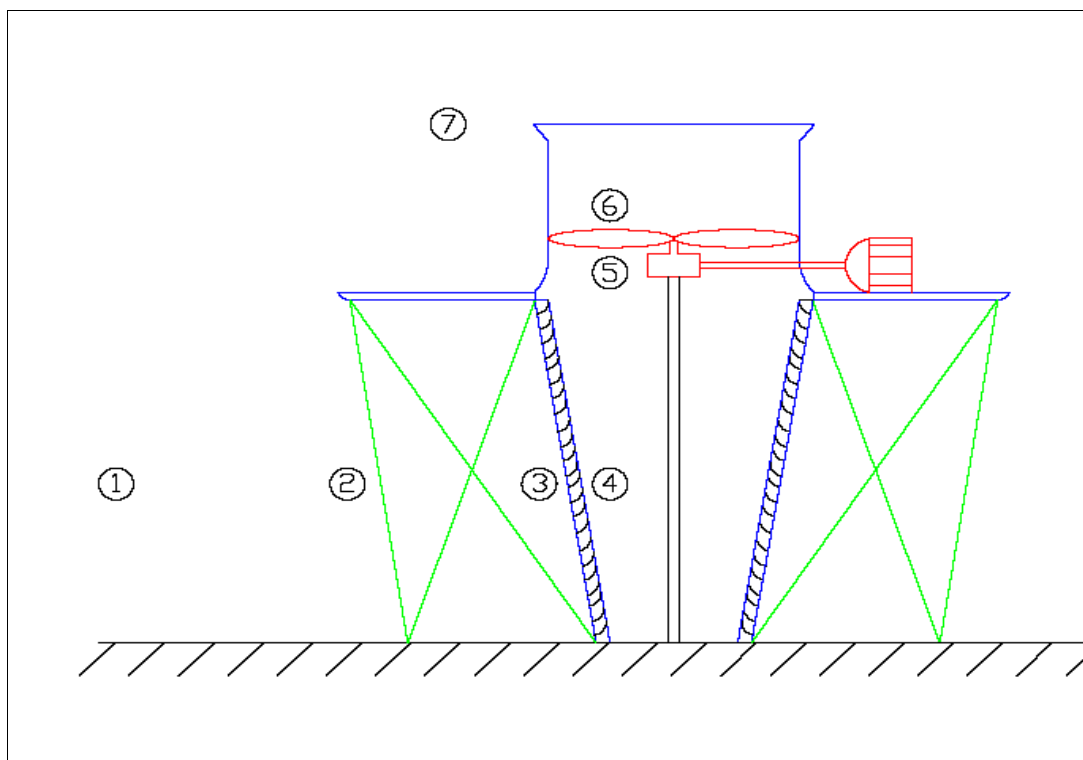


Fig.4.3. Puntos de estudio para el aire.

- Punto 1. A una altura mitad de la altura del empaquetamiento, el aire se encuentra a presión y temperatura ambiente.
- Punto 2. Es el punto de entrada del aire al empaquetamiento, el aire se encuentra a presión y temperatura ambiente.
- Punto 3. El aire ha atravesado el empaquetamiento y se ha producido la transferencia de calor.
- Punto 4. El aire ha atravesado la zona del eliminador de gotas.
- Punto 5. El aire justo antes de atravesar el ventilador.
- Punto 6. El aire justo después de atravesar el ventilador.
- Punto 7. El aire justo a la salida del difusor y la torre.



Como se ha explicado en capítulos anteriores, una torre de este tipo se basa en el uso de la ayuda mecánica de un ventilador para forzar una corriente de aire que atraviese toda la torre. Este aire, al atravesar todos y cada uno de los elementos que la conforman, sufrirá unas pérdidas de presión que tendrán que ser vencidas por la acción del ventilador. A continuación se presentan cada una de las pérdidas presentes en la torre mediante el esquema de resistencias acompañado de cada uno de los correspondientes coeficientes de pérdidas.

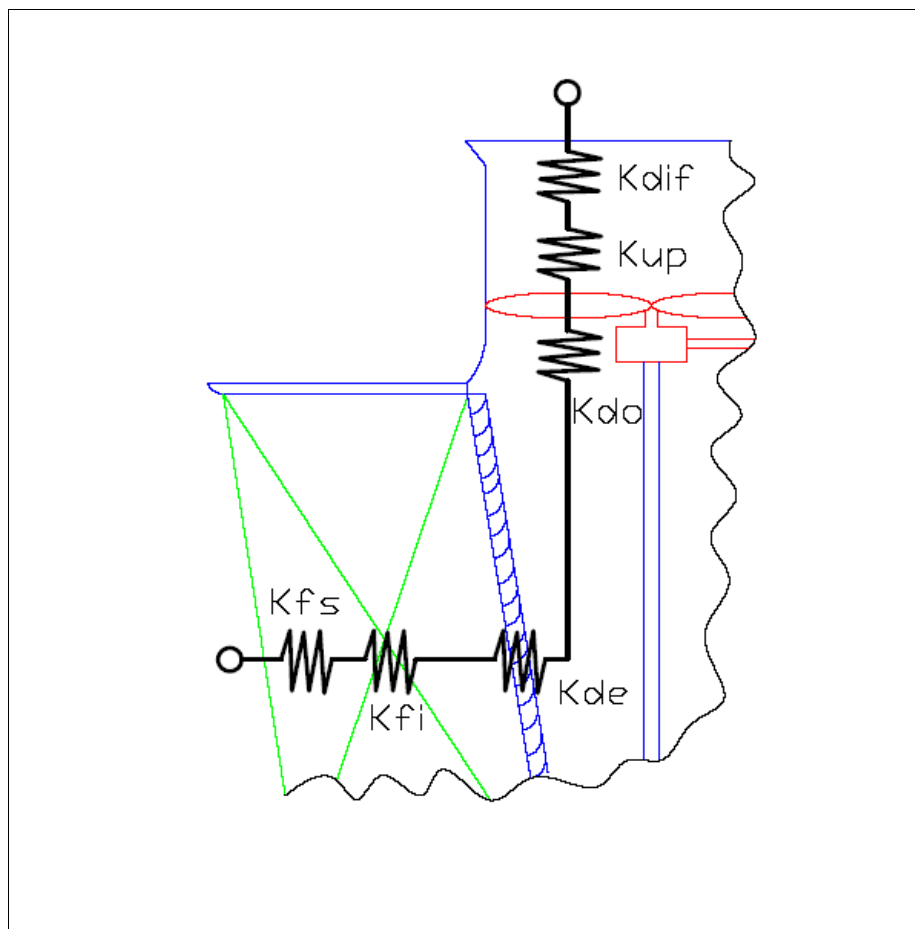


Fig.4.4. Esquema de pérdidas en el sistema.

En la figura anterior tenemos los siguientes coeficientes de pérdidas:

- K_{fs} , debido a los soportes del empaquetamiento
- K_{fi} , debido a la presencia del empaquetamiento
- K_{de} , denota pérdidas en el eliminador de gotas
- K_{do} , pérdidas por obstáculos aguas arriba del ventilador



- K_{up} , indica pérdidas por obstáculos aguas abajo del ventilador

- K_{dif} , denota pérdidas en el difusor

El eliminador de gotas se ha considerado que actúa también como una guía del aire hacia la entrada del ventilador, por lo que las pérdidas entre el eliminador de gotas y el ventilador son pequeñas.

El primer paso será estimar el flujo másico de aire que atraviesa la torre, estableciendo en principio que es igual al caudal másico de agua. Para ello, habrá que calcular la ecuación de pérdidas a través de todo el sistema, es decir, se calculara cada una de las pérdidas por separado, y con el sumatorio de ellas la pérdida de presión total. La pérdida de presión total será una función del flujo másico de aire que atraviesa la torre.

Para hallar un flujo másico de aire que satisfaga la ecuación anterior, necesitamos elegir un ventilador que sea capaz de vencer la pérdida de carga total del sistema. Nos ayudaremos de curvas características de los ventiladores como las presentadas en el capítulo anterior, concretamente elegiremos 4 curvas características para 4 ventiladores diferentes, cubriendo un amplio rango de flujos másicos, lo que nos permitirá el diseño de torres en un abanico de tamaños amplio. Las gráficas han sido tomadas del fabricante de ventiladores *Hudson Products Corp.* mediante la aplicación informática para selección de ventiladores *TufLite versión 5.0*.

Se han tomado curvas de ensayo de ventiladores de 4 tamaños diferentes:

-Modelo 12H-8. Se trata de un ventilador de diámetro 12 ft. con 8 palas y tipo de palas H.

-Modelo 20H-4. Ventilador de diámetro 20 ft, 4 palas y tipo H.

-Modelo 36H-16. Ventilador de diámetro 36 ft, 16 palas y tipo H.

-Modelo 40H-20. Ventilador de diámetro 40 ft, 20 palas y tipo H.

Las palas tipo H están fabricadas en 2 piezas de fibra de vidrio y resina epoxi.



A continuación se muestran las curvas de ensayo para estos ventiladores.

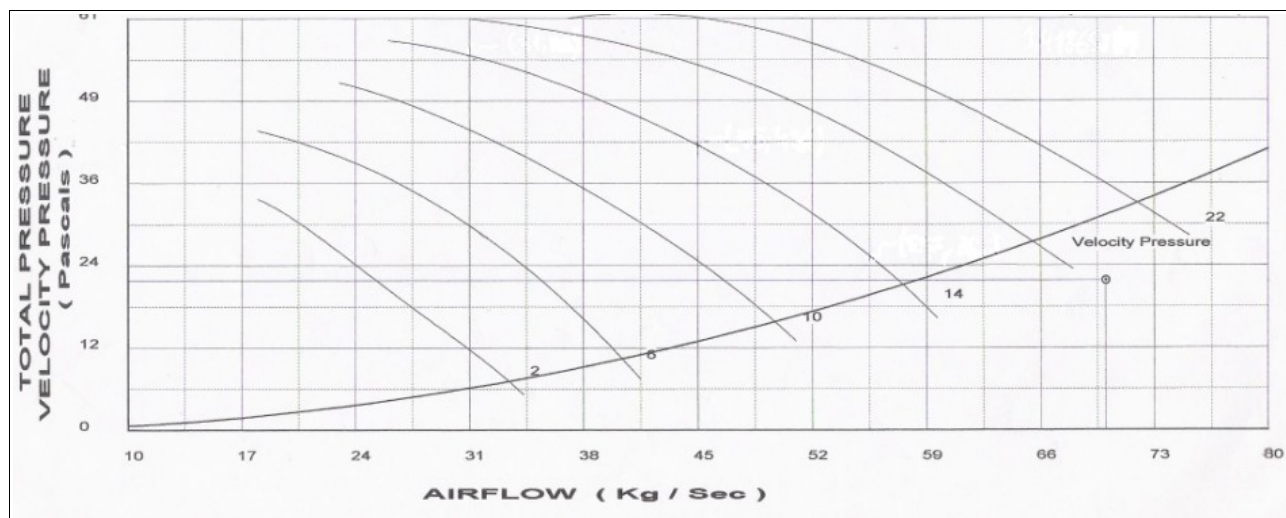


Fig.4.5. Curva de ensayo para ventilador 12H-8

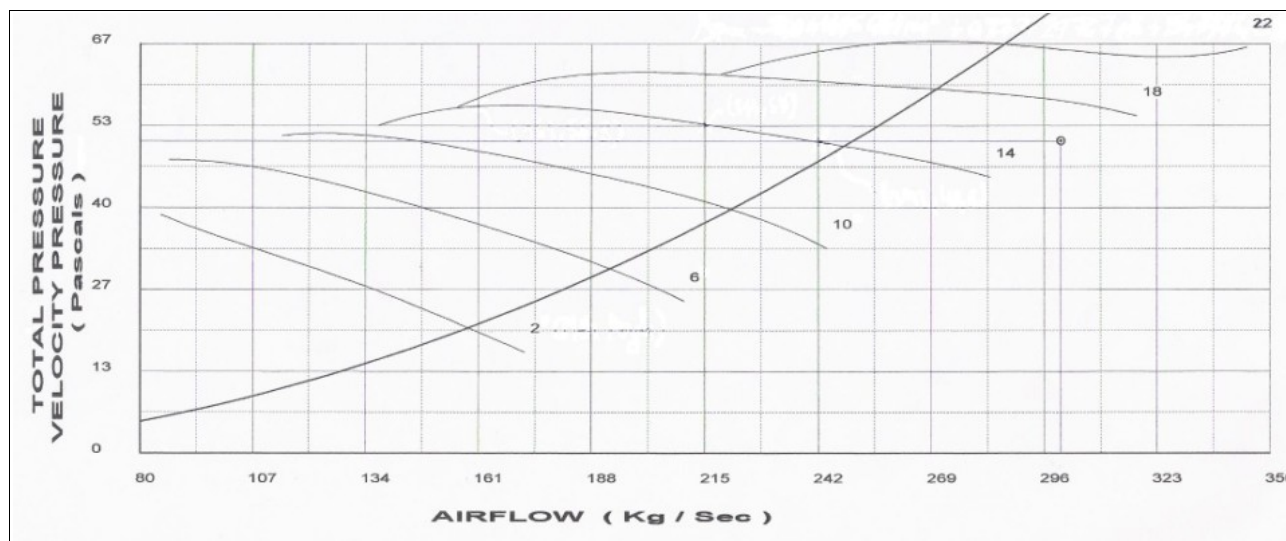


Fig.4.6. Curva de ensayo para ventilador 20H-4

En las gráficas anteriores se pueden ver varios ensayos dependiendo del denominado *pitch angle* o ángulo de giro de las palas. Se ha elegido un ángulo de 14° como referencia para todos los ensayos. También podemos ver la línea de presión dinámica, a partir de la cual se situará el punto de trabajo para los ventiladores. También son tenidos en cuenta los puntos de agotamiento o *stall*, con el fin de no hacer trabajar al ventilador cerca de puntos de inflexión de la curva.

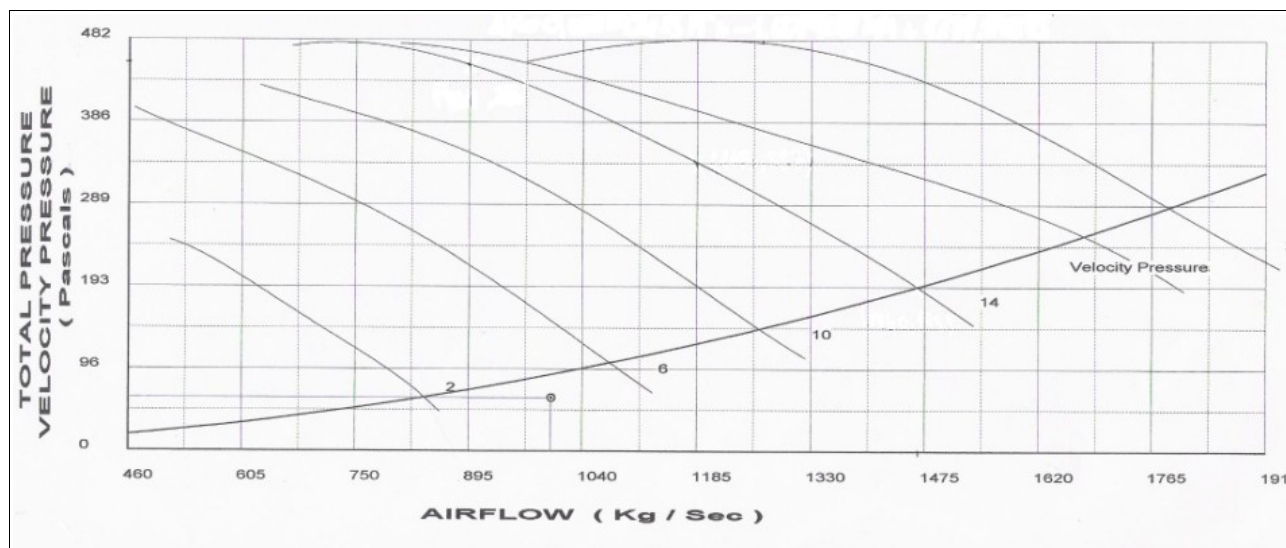


Fig.4.7. Curva de ensayo para ventilador 36H-16

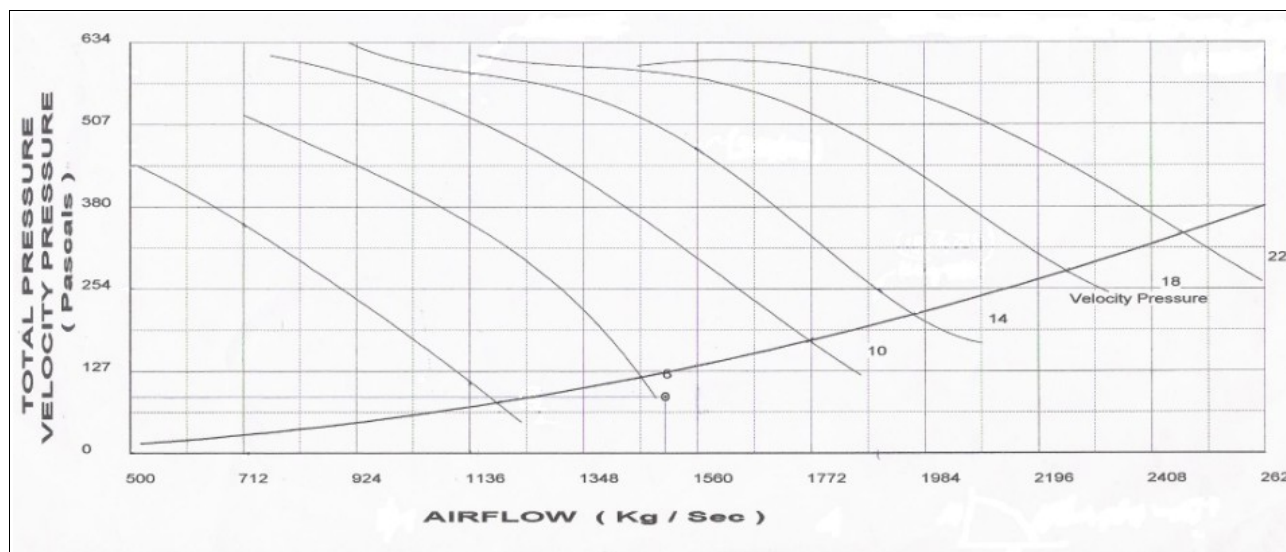


Fig.4.8. Curva de ensayo para ventilador 40H-20

Se ha seleccionado para todos los ventiladores una embocadura de entrada tipo Bell-mouth, lo que proporciona las menores pérdidas para el flujo de entrada (ver figura 3.15) y sin difusor de salida.

La densidad del aire seleccionada ha sido $\rho_t = 1,19 \text{ kg/m}^3$ y la velocidad de rotación del ventilador $N_{ft} = 110 \text{ r.p.m}$



A partir de las gráficas anteriores se hallará su expresión analítica para poder ser introducida en el programa informático.

La curva se aproximará a una ecuación cuadrática del tipo $\Delta P = a m_a^2 + b m_a + c$, siendo m_a el flujo másico de aire que atraviesa el ventilador y ΔP la pérdida de carga.

Para ello se extraen coordenadas de 3 puntos de la gráfica en pares (m_a , ΔP) y mediante el método de matricial de Cramer de solución de sistemas de ecuaciones 3x3, implementado en una hoja de cálculo, se obtiene la ecuación de tipo parabólico.

A continuación se muestra un ejemplo de la hoja de cálculo usada para hallar tal expresión analítica.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	VENTILADOR 12H-8							
2	a	-0,03	Matriz A			P	det A	
3	b	1,42	961	31	1	56	-3601,5	
4	c	41,16	2025	45	1	43,6		
5	ma1	31	3080,25	55,5	1	26,5		
6	ma2	45						
7	ma3	55,5						
9		$\Delta P = -0,03 \text{ ma}^2 + 1,42 \text{ ma} + 41,16$						

Fig.4.9.Hoja de cálculo para ventilador 12H-8

La columna P está formada por los 3 valores de ΔP obtenidos de la curva de ensayo, mientras que los valores m_{a1} , m_{a2} y m_{a3} son los correspondientes valores para el flujo másico.

Estas hojas de cálculo nos sirven para hallar las expresiones analíticas que más tarde usaremos para introducirlas en la aplicación informática, donde se seleccionarán unas u otras dependiendo del ventilador elegido.



4.4. Desarrollo del método

Partiendo de lo anteriormente expuesto, empezamos aquí a desarrollar el método de cálculo para una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado. Iremos viendo paso a paso como calcular cada una de las variables que nos conducirán a la solución del problema.

Lo primero que haremos será fijar la temperatura del aire a la salida del empaquetamiento, T_{a3} , dentro del intervalo de temperaturas comprendido entre T_{a1} , que será el límite inferior de iteración, y T_{wi} , temperatura de entrada del agua, que será el límite superior.

Se ha procedido a establecer una serie de temperaturas parciales para T_{a3} que para un correcto funcionamiento serán 25. Si al introducir una T_{a3} determinada, el valor de la pérdida de carga en el ventilador es mayor que el valor debido a las resistencias en el sistema, se sabrá que las curvas formadas por ambas ecuaciones se cortan, y por lo tanto que el problema tiene solución. En tal caso se tomará el valor del flujo másico de aire que cumple esta condición como solución.

En la figura siguiente se muestran las curvas para la pérdida de carga vencida por el ventilador, en azul, así como la pérdida de presión en el sistema, en rojo. Ambas son función del flujo másico que atraviesa la torre. Las unidades para la pérdida de carga son N/m^2 y para m_a , flujo másico de agua son kg/s .

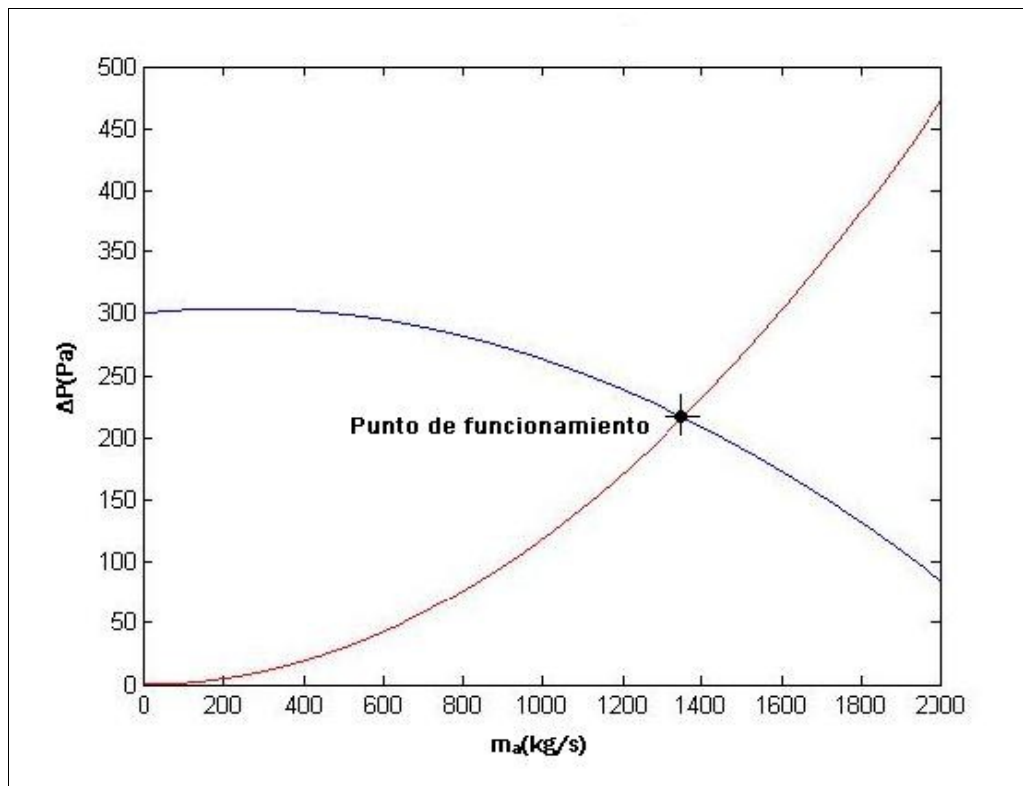


Fig.4.10. Ejemplo de punto de funcionamiento para la torre



La gráfica anterior nos indica que para una temperatura de salida del aire determinada, T_{a3} , la cantidad de caudal másico que moverá el ventilador será aproximadamente 1400 kg/s.

Además de lo anterior, se habrá de cumplir una condición adicional: que la cantidad de calor absorbida por el aire sea igual a la cedida por el agua. Por lo tanto cuando la cantidad de calor absorbida por el fluido frío, en este caso el aire, supere a la cantidad de calor cedida por el fluido caliente, en este caso el agua, sabremos que la solución al problema se da a dicha T_{a3} .

Tras esta breve explicación del desarrollo del método, pasaremos al desarrollo detallado.

Para empezar, haremos 3 hipótesis:

- Los cambios en presión absoluta son pequeños, por lo que todas las propiedades termo-físicas pueden ser evaluadas a la presión P_{a1} .
- Los efectos de flotabilidad propios de torres de tiro natural pueden ser ignorados.
- Se asume que la distribución del flujo de aire y agua son uniformes.
- Se asume que el aire a la salida del empaquetamiento se encuentra en estado saturado.

Una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado se resuelve siguiendo un proceso iterativo y asumiendo inicialmente un valor para el flujo másico que atraviesa la torre, m_a . Este valor inicial será $m_a = m_w$, es decir, tomará igual valor inicial que el flujo másico de agua.

Para analizar la torre de refrigeración en flujo cruzado, usamos el método de eficiencia-NTU, explicado en el apartado 3.3. Para ello primero haremos lo siguiente:

Evaluamos los calores específicos del aire seco y del vapor de agua a la temperatura media $T_r = (273,15 + T_{a1})/2$. Calor específico del aire:

$$C_{pa} = 1.045356 \times 10^3 - 3.161783 \times 10^{-1} T_r + 7.083814 \times 10^{-4} T_r^2 - 2.705209 \times 10^{-7} T_r^3, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.1.

Y de forma análoga, calor específico del vapor de agua:

$$C_{pv} = 1.3605 \times 10^3 + 2.31334 T_r - 2.46784 \times 10^{-10} T_r^5 + 5.91332 \times 10^{-13} T_r^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.2.



Usando la siguiente ecuación, hallamos la presión parcial del vapor a la temperatura de bulbo húmedo T_{wb} :

$$p_{vwb} = 10^z, \text{ N/m}^2$$

$$z = 10.79586 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wb}} \right) + 5.02808 \log 10 \left(\frac{273.16}{T_{wb}} \right) + 1.50474 \times 10^{-4}$$

$$\times \left[1 - 10^{-8.29692 \left(\left(\frac{T_{wb}}{273.16} \right) - 1 \right)} \right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wb}} \right) - 1} \right] + 2.786118312$$

Ec.4.3.

Con estos valores, encontramos la relación de humedades en la entrada del empaquetamiento, punto 1, usando la siguiente expresión:

$$\omega_1 = \left(\frac{2501.6 - 2.3263(T_{wb} - 273.15)}{2501.6 + 1.8577(T_{a1} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right) \left(\frac{0.62509 p_{vwb}}{p_{a1} - 1.005 p_{vwb}} \right)$$

$$- \left(\frac{1.00416(T_{a1} - T_{wb})}{2501.6 + 1.8577(T_{a1} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right), \text{ kg/kg de aire seco}$$

Ec.4.4.

Sustituyendo los valores previos, hallamos el valor de i_{ma1} de la siguiente ecuación:

$$i_{ma1} = C_{pa}(T_{a1} - 273.15)w_1[i_{fgwo} + C_{pv}(T_{a1} - 273.15)], \text{ J/kg de aire seco}$$

Ec.4.5.

donde el calor latente i_{fgwo} , es evaluado a $T=273.15$ K atendiendo a la expresión:

$$i_{fgwo} = 3.4831814 \times 10^6 - 5.8627703 \times 10^3 T + 12.139568 T^2 - 1.40290431 \times 10^{-2} T^3, \text{ J/kg}$$

Ec.4.6.

Por lo que,

$$i_{fgwo} = 2.5016 \times 10^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.7



De forma similar, encontramos la entalpía del aire saturado a la temperatura de entrada del agua, T_{wi} .

Evalúamos los calores específicos del aire seco y del vapor de agua a la temperatura media $T_r = (273,15 + T_{wi})/2$. Calor específico del aire:

$$C_{pa} = 1.045356 \times 10^3 - 3.161783 \times 10^{-1} T_r + 7.083814 \times 10^{-4} T_r^2 - 2.705209 \times 10^{-7} T_r^3, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.8.

Y de forma análoga, calor específico del vapor de agua:

$$C_{pv} = 1.3605 \times 10^3 + 2.31334 T_r - 2.46784 \times 10^{-10} T_r^5 + 5.91332 \times 10^{-13} T_r^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.9.

Hallamos la presión parcial del vapor a la temperatura T_{wi} :

$$p_{vwi} = 10^z, \text{ N/m}^2$$

$$z = 10.79586 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wi}} \right) + 5.02808 \log 10 \left(\frac{273.16}{T_{wi}} \right) + 1.50474 \times 10^{-4}$$

$$\times \left[1 - 10^{-8.29692 \left(\left(\frac{T_{wi}}{273.16} \right) - 1 \right)} \right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wi}} \right) - 1} + 2.786118312 \right]$$

Ec.4.10.

Encontramos la relación de humedades en la entrada del empaquetamiento, a la temperatura T_{wi} donde $T_{wb} = T_{wi}$:

$$\omega_{wi} = \left(\frac{2501.6 - 2.3263(T_{wb} - 273.15)}{2501.6 + 1.8577(T_{wi} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right) \left(\frac{0.62509 p_{vwi}}{p_{a1} - 1.005 p_{vwi}} \right)$$

$$- \left(\frac{1.00416(T_{wi} - T_{wb})}{2501.6 + 1.8577(T_{wi} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right), \text{ kg/kg de aire seco}$$

Ec.4.11.

Por lo que la entalpía i_{maswi} quedará:

$$i_{maswi} = C_{pa}(T_{wi} - 273.15) + w[i_{fgwo} + C_{pv}(T_{wi} - 273.15)], \text{ J/kg de aire seco}$$

Ec.4.12.



Y de igual manera calculamos la entalpía para el aire saturado a la temperatura de salida del agua, T_{wo}

Calores específicos del aire seco y del vapor de agua a la temperatura media $T_r = (273,15 + T_{wo})/2$. Calor específico del aire:

$$C_{pa} = 1.045356 \times 10^3 - 3.161783 \times 10^{-1} T_r + 7.083814 \times 10^{-4} T_r^2 - 2.705209 \times 10^{-7} T_r^3, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.13.

Calor específico del vapor de agua:

$$C_{pv} = 1.3605 \times 10^3 + 2.31334 T_r - 2.46784 \times 10^{-10} T_r^5 + 5.91332 \times 10^{-13} T_r^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.14.

Hallamos la presión parcial del vapor a la temperatura T_{wo} :

$$p_{vwo} = 10^z, \text{ N/m}^2$$

$$z = 10.79586 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wo}} \right) + 5.02808 \log 10 \left(\frac{273.16}{T_{wo}} \right) + 1.50474 \times 10^{-4}$$

$$\times \left[1 - 10^{-8.29692 \left(\left(\frac{T_{wo}}{273.16} \right) - 1 \right)} \right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wo}} \right) - 1} \right] + 2.786118312$$

Ec.4.15.

Encontramos la relación de humedades en la entrada del empaquetamiento, a la temperatura T_{wo} donde $T_{wb} = T_{wo}$:

$$\omega_{wo} = \left(\frac{2501.6 - 2.3263(T_{wb} - 273.15)}{2501.6 + 1.8577(T_{wo} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right) \left(\frac{0.62509 p_{vwb}}{p_{a1} - 1.005 p_{vwb}} \right)$$

$$- \left(\frac{1.00416(T_{wo} - T_{wb})}{2501.6 + 1.8577(T_{wo} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right), \text{ kg/kg de aire seco}$$

Ec.4.16.

Por lo que la entalpía del aire saturado a la temperatura de salida del agua: i_{maswo} quedará:

$$i_{maswo} = C_{pa}(T_{wo} - 273.15) + w[i_{gwo} + C_{pv}(T_{wo} - 273.15)], \text{ J/kg de aire seco}$$

Ec.4.17



Y por último, la entalpía del aire saturado a la temperatura media entre la entrada y la salida del agua, $T_{wm} = (T_{wi} + T_{wo})/2$.

Calores específicos del aire seco y del vapor de agua a la temperatura media $T_r = (273,15 + T_{wm})/2$. Calor específico del aire:

$$C_{pa} = 1.045356 \times 10^3 - 3.161783 \times 10^{-1} T_r + 7.083814 \times 10^{-4} T_r^2 - 2.705209 \times 10^{-7} T_r^3, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.18.

Calor específico del vapor de agua:

$$C_{pv} = 1.3605 \times 10^3 + 2.31334 T_r - 2.46784 \times 10^{-10} T_r^5 + 5.91332 \times 10^{-13} T_r^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.19.

Hallamos la presión parcial del vapor a la temperatura T_{wm} :

$$p_{vwm} = 10^z, \text{ N/m}^2$$

$$z = 10.79586 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wm}} \right) + 5.02808 \log 10 \left(\frac{273.16}{T_{wm}} \right) + 1.50474 \times 10^{-4}$$

$$\times \left[1 - 10^{-8.29692 \left(\left(\frac{T_{wm}}{273.16} \right) - 1 \right)} \right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{wm}} \right) - 1} \right] + 2.786118312$$

Ec.4.20.

Encontramos la relación de humedades en la entrada del empaquetamiento, a la temperatura T_{wm} donde $T_{wb} = T_{wm}$:

$$\omega_{wm} = \left(\frac{2501.6 - 2.3263(T_{wb} - 273.15)}{2501.6 + 1.8577(T_{wm} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right) \left(\frac{0.62509 p_{vwb}}{p_{a1} - 1.005 p_{vwb}} \right)$$

$$- \left(\frac{1.00416(T_{wm} - T_{wb})}{2501.6 + 1.8577(T_{wm} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right), \text{ kg/kg de aire seco}$$

Ec.4.21.

Por lo que la entalpía del aire saturado a la temperatura de salida del agua, i_{maswm} quedará:

$$i_{maswm} = C_{pa}(T_{wm} - 273.15) + w[i_{fgwo} + C_{pv}(T_{wm} - 273.15)], \text{ J/kg de aire seco}$$

Ec.4.22.



Haciendo uso de la ecuación 3.41, el gradiente de la curva entalpía-temperatura puede ser expresado como:

$$GRADIENTE = \frac{di_{masw}}{dT_w} \approx \frac{i_{maswi} - i_{maswo}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

Ec.4.23.

Con este valor y el calor específico medio del agua, C_{pwm} , evaluado de acuerdo a la ecuación:

$$C_{pwm} = 8.15599 \times 10^3 - 2.80627 \times 10 T_{wm} + 5.11283 \times 10^{-2} T_{wm}^2 - 2.17582 \times 10^{-13} T_{wm}^6, \text{ J/kgK}$$

Ec.4.24.

Donde al igual que antes, $T_{wm} = (T_{wi} + T_{wo})/2$.

Encontramos las capacitancias máxima y mínima correspondientes, dependiendo de si nos encontramos en el caso 1 o 2 explicados en el apartado 3.3.

Si se cumple el caso 1:

$$m_w C_{pwm} / GRADIENTE < m_a$$

Ec.4.25

Los valores para C_{emin} y C_{emax} serán:

$$C_{emin} = m_w C_{pwm} / GRADIENTE$$

Ec.4.26.

$$C_{emax} = m_a$$

Ec.4.27.

Si se cumple el caso 2:

$$m_a < m_w C_{pwm} / GRADIENTE$$

Ec.4.28

tendríamos:

$$C_{emin} = m_a$$

Ec.4.29.

$$C_{emax} = m_w C_{pwm} / GRADIENTE$$

Ec.4.30.



En ambos casos obtenemos el valor C_e , así:

$$C_e = C_{emin} / C_{emax}$$

Ec.4.31.

De acuerdo con la ecuación 3.48. hallamos el parámetro λ :

$$\lambda = (i_{maswo} + i_{maswi} - 2i_{maswm}) / 4$$

Ec.4.32.

Se obtendrá de la ecuación 3.49. el valor de la cantidad de calor máxima transferida:

$$Q_{max} = C_{emin}(i_{maswi} - \lambda - i_{ma1})$$

Ec.4.33.

Ahora desarrollaremos los cálculos correspondientes al empaquetamiento, necesarios para el método de eficiencia-NTU, comenzando por calcular el coeficiente de transferencia por unidad de ATD. Como vimos en la figura 3.25:

$$\frac{h_d a_{fi}}{G_w} = \frac{h_d A}{m_w(ATD)} = \frac{2 h_d a_{fi} H^3 W^3 (ATD)}{m_w(ATD)} = a_d \left(\frac{G_w}{Ga} \right)^{-bd}$$

Ec.4.34.

Donde

$$G_w = m_w / A_{frw}, \text{ kg/sm}^2$$

Ec.4.35.

y

$$Ga = m_a / A_{fra}, \text{ kg/sm}^2$$

Ec.4.36.

En donde:

$$A_{fra} = 2 H^3 W^3, \text{ m}^2$$

Ec.4.37

$$A_{frw} = 2 W^3 ATD, \text{ m}^2$$

Ec.4.38.

a_d y b_d dependen exclusivamente del tipo de empaquetamiento elegido.



Acorde a la ecuación 3.37:

$$NTU_e = \frac{h_d A (GRADIENTE)}{m_w C_{pw}} = \frac{h_d a_{fi} m_w H_3}{G_w C_{emin}}$$

Ec.4.39.

De acuerdo a la figura siguiente, que representa la efectividad de diversos intercambiadores de calor, dependiendo del sentido de los flujos de los fluidos que intercambian calor, para flujo cruzado con ambos extremos sin mezclar:

Flow geometry	Relation
Parallel flow	$e = \frac{1 - \exp[-N(1 + C)]}{(1 + C)}$
Counterflow	$e = \frac{1 - \exp[-N(1 - C)]}{1 - C \exp[-N(1 - C)]}$
Counterflow, $C = 1$	$e = \frac{N}{N + 1}$
Crossflow with both streams unmixed	$e = 1 - \exp\left[N^{0.22} \left\{ \exp(-CN^{0.78}) - 1 \right\} / C\right]$
Crossflow with both streams mixed	$e = \left[\frac{1}{1 - \exp(-N)} + \frac{C}{1 - \exp(-NC)} - \frac{1}{N} \right]^{-1}$
Crossflow with C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$e = [1 - \exp\{-C(1 - \exp(-N))\}] / C$
Crossflow with C_{max} unmixed, C_{min} mixed	$e = 1 - \exp[-\{1 - \exp(-NC)\} / C]$
All exchangers with $C = 0$	$e = 1 - \exp(-N)$

Fig.4.11. Efectividad en intercambiadores de calor.

La efectividad puede ser expresada como:

$$e_e = 1 - \exp\left[NTU_e^{0.22} \left\{ \exp(-C_e NTU_e^{0.78}) - 1 \right\} / C_e\right]$$

Ec.4.40.



Con ayuda de las ecuaciones 4.33 y 4.40 la transferencia de calor se obtiene así:

$$Q = e_e Q_{max}$$

Ec.4.41.

La temperatura de salida del agua, T_{wo} , se obtendrá de la ecuación 3.39:

$$Q = m_w C_{pwm} (T_{wi} - T_{wo})$$

Ec.4.42.

o de otro modo:

$$T_{wo} = T_{wi} - Q / (m_w C_{pwm})$$

Ec.4.43.

Con la temperatura de salida del agua, calculamos el acercamiento de la torre o *approach*:

$$app = T_{wo} - T_{wb}$$

Ec.4.44.

También sabemos de la ecuación 3.39 que:

$$m_w C_{pwm} (T_{wi} - T_{wo}) = m_a (i_{ma3} - i_{ma1})$$

Ec.4.45.

De lo que deducimos que la entalpía del aire, a la salida del empaquetamiento, punto 3, será:

$$i_{ma3} = (m_w / m_a) C_{pwm} (T_{wi} - T_{wo}) + i_{ma1}$$

Ec.4.46.

Dado que el análisis asume que el aire que abandona el empaquetamiento se encuentra saturado, diremos que $i_{ma3} = i_{mas3}$:

$$i_{mas3} = i_{ma3} = (m_w / m_a) C_{pwm} (T_{wi} - T_{wo}) + i_{ma1}$$

Ec.4.47.

Dada una T_{a3} determinada, se hallarán los calores específicos para aire seco y vapor de agua, atendiendo a la expresiones anteriormente descritas, Ec.4.1 y Ec 4.2, con $T_r = (T_{a3} + 273,15) / 2$.



De forma análoga a lo realizado anteriormente, encontrar la presión parcial del vapor de agua saturado a la temperatura T_{a3} .

$$p_{v3} = 10^z, \text{ N/m}^2$$

$$z = 10.79586 \left(1 - \frac{273.16}{T_{a3}} \right) + 5.02808 \log_{10} \left(\frac{273.16}{T_{a3}} \right) + 1.50474 \times 10^{-4}$$

$$\times \left[1 - 10^{-8.29692 \left[\left(\frac{T_{a3}}{273.16} \right) - 1 \right]} \right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{a3}} \right) - 1} \right] + 2.786118312$$

Ec.4.48.

Mientras que la correspondiente relación de humedades sera obtenida de:

$$\omega_3 = \left(\frac{2501.6 - 2.3263(T_{wb} - 273.15)}{2501.6 + 1.8577(T_{a3} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right) \left(\frac{0.62509 p_{vwb}}{p_{a3} - 1.005 p_{vwb}} \right)$$

$$- \left(\frac{1.00416(T_{a3} - T_{wb})}{2501.6 + 1.8577(T_{a3} - 273.15) - 4.184(T_{wb} - 273.15)} \right), \text{ kg/kg de aire seco}$$

Ec.4.49.

Con $T_{wb} = T_{a3}$

Con estos valores, encontrar la entalpía del aire a la salida del empaquetamiento, de acuerdo con la ecuación:

$$i_{ma3} = C_{pa}(T_{a3} - 273.15)w_3[i_{fgwo} + C_{pv}(T_{a3} - 273.15)], \text{ J/kg de aire seco}$$

Ec.4.50.

El valor de i_{ma3} irá variando con arreglo a los valores que tome T_{a3} , como se explicó anteriormente. A la hora de programar el método, la condición que nos dará la solución para T_{a3} será que $i_{ma3} \geq i_{mas3}$ tomado de la ecuación 4.46.

Además de cumplir con la ecuación de la energía anteriormente descrita, se habrá de cumplir con la ecuación de pérdidas.

Para determinar los diferentes coeficientes de pérdidas, primero encontramos el flujo másico de la mezcla aire-vapor de agua a la entrada del empaquetamiento:

$$m_{av2} = m_{av1} = m_a(1 + w_1)$$

Ec.4.51.



Dado que la solución para este tipo de torres es un problema iterativo, en la ecuación anterior y como hemos explicado, se toma un valor inicial para m_a , $m_a = m_w$.

La densidad correspondiente se extrae de la ecuación:

$$\rho_{av2} = \rho_{av1} = (1 + w_1) \left[1 - \frac{w_1}{(w_1 + 0.62198)} \right] p_{a1} / (287.08 T_{a1}), \text{ kg de aire-vapor/m}^3$$

Ec.4.52.

La correspondiente velocidad de la corriente de aire-vapor será:

$$v_{av1} = (m_a(1 + w_1)) / (\rho_{av1} A_{fr}), \text{ m / s}$$

Ec.4.53.

Después del empaquetamiento, la densidad de la mezcla aire-vapor, será:

$$\rho_{av3} = (1 + w_3) \left[1 - \frac{w_3}{(w_3 + 0.62198)} \right] p_{a3} / (287.08 T_{a3}), \text{ kg de aire-vapor/m}^3$$

Ec.4.54.

Teniendo en cuenta que $p_{a3} = p_{a1}$

El flujo de la mezcla aire-vapor después del empaquetamiento será:

$$m_{av3} = m_a(1 + w_3)$$

Ec.4.55.

La velocidad correspondiente será:

$$v_{av3} = (m_a(1 + w_3)) / (\rho_{av3} A_{fra}), \text{ m / s}$$

Ec.4.56.

La densidad media de la mezcla aire-vapor a lo largo del empaquetamiento será:

$$\rho_{av13} = \frac{2}{\left(\frac{1}{\rho_{av1}} + \frac{1}{\rho_{av3}} \right)}, \text{ kg/m}^3$$

Ec.4.57.



El flujo másico medio de la mezcla aire-vapor a través del empaquetamiento será:

$$m_{av13} = [m_a(1 + w_1) + m_v(1 + w_3)] / 2, \text{ kg/s}$$

Ec.4.58.

La correspondiente velocidad de la corriente de aire-vapor será:

$$v_{av13} = m_{av13} / (\rho_{av13} A_{fr}), \text{ m/s}$$

Ec.4.59.

La viscosidad dinámica de la mezcla aire-vapor será:

$$\mu_a = \frac{X_a \mu_a M_a^{0.5} + X_v \mu_v M_v^{0.5}}{(X_a M_a + X_v M_v)}, \text{ kg/ms}$$

Ec.4.60

Donde:

$$\mu_a = 2.287973 \times 10^{-6} + 6.259793 \times 10^{-8} T_{a3} - 3.131956 \times 10^{-11} T_{a3}^2 + 8.15038 \times 10^{-15} T_{a3}^3, \text{ kg/ms}$$

Ec.4.61

$$\mu_v = 2.562435 \times 10^{-6} + 1.816683 \times 10^{-8} T_{a3} - 2.579066 \times 10^{-11} T_{a3}^2 - 1.067299 \times 10^{-14} T_{a3}^3, \text{ kg/ms}$$

Ec.4.62

$$M_a = 28.97 \text{ kg/mol}$$

$$M_v = 18.016 \text{ kg/mol}$$

$$X_a = 1 / (1 + 1.608 w_1)$$

$$X_v = w_1 / (w_1 + 0.622)$$

Después de calcular las propiedades de la mezcla aire-agua, pasaremos a calcular las pérdidas.

El coeficiente de pérdidas en soportes del empaquetamiento, expresado en condiciones del empaquetamiento vendrá dado por la expresión:

$$K_{fsfi} = 0.5 \left(\frac{\rho_{av13}}{\rho_{av1}} \right) \left(\frac{m_{av1}}{m_{av13}} \right)^2$$

Ec.4.63.



El coeficiente de pérdidas a lo largo del empaquetamiento está dado por:

$$K_{fi} = K_{fi1} ATD + (\rho_{av3} v_{av3}^2 / 2 - \rho_{av1} v_{av1}^2 / 2) / (\rho_{av13} v_{av13}^2 / 2)$$

Ec.4.64.

Las pérdidas en el eliminador de gotas, se basarán en las condiciones en el empaquetamiento, quedando de la forma:

$$K_{defi} = K_{de} \left(\frac{\rho_{av13}}{\rho_{av3}} \right) \left(\frac{m_{av3}}{m_{av13}} \right)^2$$

Ec.4.65.

donde

$$K_{de} = 27.4892 \left(\frac{m_{av3}}{(\mu_{av3} A_{fr})} \right)^{-0.14247}$$

Ec.4.66.

Las pérdidas por obstáculos en la succión e impulsión del ventilador, que se calculan según las ecuaciones 3.63 y 3.64, serán estimadas con ayuda de las figuras 3.13 y 3.14, de la siguiente manera:

$$K_{ud} = K_{up} + K_{do} = 0.5$$

Ec.4.67.

Las pérdidas en el difusor son calculadas mediante las ecuaciones 3.69 y 3.70. Además se tienen en cuenta condiciones de flujo simétrico en la entrada, por lo que $\eta_{dif} = 0,8$.

$$K_{dif} = (1 - \eta_{dif})(1 - \sigma_{12}^2) = (1 - 0.8)(1 - 0.83^2) = 0.062$$

Ec.4.68.

La velocidad media de la mezcla a lo largo del ventilador puede ser aproximada por la siguiente expresión:

$$v_{Fav} = \frac{4m_{av3}}{\rho_{av3} \pi D_c^2}$$

Ec.4.69.



Resumiendo, la ecuación de pérdidas en el sistema quedaría:

$$\Delta p_{sist} = (K_{fsfi} + K_{fi} + K_{defi}) \rho_{av13} v_{av13}^2 / 2 + (K_{ud} - K_{dif}) \rho_{av3} v_{Fav}^2 / 2$$

Ec.4.70.

Sustituyendo cada una de las pérdidas en su lugar obtenemos:

$$\Delta p_{sist} = \left[0.5 \left(\rho_{av13} / \rho_{av1} \right) \left(m_{av1} / m_{av13} \right)^2 + a_p G w^{bpa} G a^{bpb} (ATD) + \right. \\ \left. + \left(\rho_{av3} v_{av3}^2 / 2 - \rho_{av1} v_{av1}^2 / 2 \right) / \left(\rho_{av13} v_{av13}^2 / 2 \right) + \right. \\ \left. 27.4892 (m_{av3} / \mu_{av3} A_{fra})^{-0.14247} \left(\rho_{av13} / \rho_{av3} \right) \left(m_{av3} / m_{av13} \right)^2 \right] \rho_{av13} v_{av13}^2 / 2 + (0.5 - 0.062) \rho_{av3} v_{Fav}^2 / 2$$

Ec.4.71.

Desarrollando términos quedará:

$$\Delta p_{sist} = \left[0.5 \left(\frac{\rho_{av13}}{\rho_{av1}} \right) \left(\frac{2(1+w_1)}{2+w_1+w_3} \right)^2 + a_p G w^{bpa} \left(\frac{m_a}{A_{fra}} \right)^{bpb} (ATD) + \right. \\ \left. + \frac{\rho_{av3} \left[\frac{(1+w_3)}{4\rho_{av3}A_{fra}} \right]^2 - \rho_{av1} \left[\frac{(1+w_1)}{4\rho_{av1}A_{fra}} \right]^2}{\rho_{av13} \left[\frac{(2+w_1+w_3)}{\rho_{av13}A_{fra}} \right]^2} + \right. \\ \left. + 27.4892 \left(\frac{m_a(1+w_3)}{\mu_{av3}A_{fra}} \right)^{-0.14247} \left(\frac{\rho_{av13}}{\rho_{av3}} \right) \left(\frac{2(1+w_3)}{2+w_1+w_3} \right)^2 \right] \frac{\rho_{av13}}{2} \left[\frac{m_a(2+w_1+w_3)}{\rho_{av13}A_{fra}} \right]^2 + 0.438 \left(\frac{\rho_{av3}}{2} \left[\frac{4m_a(1+w_3)}{\pi\rho_{av3}D_c^2} \right]^2 \right)$$

Ec.4.72.

Agrupando términos en torno a los diferentes grados que presenta m_a obtenemos una ecuación del tipo:

$$\Delta p_{sist} = A_s m_a^2 + B_s m_a^{2+bpb} + C_s m_a^{1.85753}$$

Ec.4.73.

Como explicamos en el apartado 4.3. para cada tipo de ventilador, tendremos una ecuación para la pérdida de carga del tipo:

$$\Delta p_{vent} = A1 m_a^2 + B1 m_a + C$$

Ec.4.74.



Igualando las ecuaciones 4.69. y 4.70.obtenemos:

$$\Delta p = \Delta p_{vent} - \Delta p_{sist} = 0$$

Ec.4.75.

Sustituyendo valores queda:

$$\Delta p = (A1 - A_s) m_a^2 + B1 m_a - B_s m_a^{2+bpb} - C_s m_a^{1.85753} + C = 0$$

Ec.4.76.

La solución para esta ecuación nos dará el valor de m_a para el punto de funcionamiento del ventilador en el sistema estudiado.

Para hallar la solución se usará el método de Newton para solución de ecuaciones. Para ello calcularemos primero la derivada de la función anterior, que será:

$$\Delta p' = 2 (A1 - A_s) m_a - (2 + b_{pb}) B_s m_a^{1+bpb} - 1.85753 C_s m_a^{0.85753} + B1$$

Ec.4.77.

La solución se halla siguiendo un método iterativo con 40 iteraciones mediante el siguiente algoritmo:

$$m_a(i) = m_a(i-1) - \frac{\Delta p(i)}{\Delta p'(i)}$$

Ec.4.78.

Como se ha indicado en ocasiones anteriores el valor inicial para m_a es $m_a = m_w$



4.5. Comprobación del método

Con el objeto de comprobar el método desarrollado anteriormente, se ha elegido un problema resuelto perteneciente al libro del profesor Detlev G. Kröger, de título: "*Air-cooled heat exchangers and cooling towers, thermal-flow performance evaluation and design*", Vol2.

Los datos de partida para dicho problema son:

Datos de la geometría de la torre:

$$-H_3 = 11 \text{ (m)}.$$

$$-H_6 = 12 \text{ (m)}.$$

$$-H_7 = 15 \text{ (m)}.$$

$$-ATD = 4,57 \text{ (m)}.$$

$$-W_3 = 11 \text{ (m)}.$$

Datos del empaquetamiento:

Material: Heavy-duty, Doron V-bar 101,6x203,2 mm.

$$-a_d = 0,268.$$

$$-b_d = 0,56.$$

$$-a_p = 0,751.$$

$$-b_{pa} = 0,66.$$

$$-b_{pb} = -0,73.$$

Coeficiente de pérdidas de los soportes del empaquetamiento basado en condiciones del empaquetamiento:

$$-K_{fsfi} = 0,5.$$

Coeficiente de pérdidas de corriente abajo y eliminador de gotas basadas en condiciones del flujo de corriente abajo.

$$-K_{de} = 3.$$



Datos del agua a la entrada:

- $m_w = 1000 \text{ (kg/s)}$.

- $T_{wi} = 317,15 \text{ (K)}$.

Datos del aire a la entrada:

- $T_{a1} = 306,65 \text{ (K)}$.

- $T_{wb} = 298,15 \text{ (K)}$.

- $P_{a1} = 101000 \text{ (N/m}^2\text{)}$.

Datos del ventilador y difusor:

- $D_f = 9,5 \text{ (m)}$.

- $D_c = 9,5265 \text{ (m)}$.

- $N_f = 118 \text{ (r.p.m)}$.

- $H_{dif} = 3 \text{ (m)}$.

- $\rho_t = 1,2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

- $N_{ft} = 120 \text{ (r.p.m)}$.

-Embocadura de entrada tipo Bellmouth.

- $\Delta p_{vent} = 299,903 + 40,0071 \times 10^{-3} Q_{ft} - 96,5087 \times 10^{-6} Q_{ft}^2 - 152,2243 \times 10^{-9} Q_{ft}^3$
(N/m²).



En la siguiente tabla se muestra la comparación de resultados obtenidos en el problema resuelto del libro anteriormente descrito y el método desarrollado en este capítulo:

	Problema Kröger	Método Desarrollado
T_{wo} (K)	303,59	303,59
T_{a3} (K)	308,77	308,96
m_a (kg/s)	982,15	979,33
$Q_{intercambiado}$ (MW)	56,60	56,60
Δp_{vent} (N/m ²)	117,50	117,48
G_a (kg/sm ²)	4,06	4,05
G_w (kg/sm ²)	9,94	9,94

Fig.4.12. Tabla comparativa de resultados

Con los resultados anteriores podemos decir que el método se ha desarrollado de forma correcta, siendo un método válido para ser implementado como código informático para desarrollar nuestra aplicación.



Capítulo 5. Interfaz usuario de la aplicación informática



5.1. Introducción

En este apartado se intentará mostrar cada una de las partes que componen la interfaz gráfica de la aplicación informática desarrollada a partir del método explicado en el capítulo anterior.

Se comienza con una introducción a la herramienta usada para tal desarrollo, la herramienta Guide del programa informático Matlab. Mediante esta herramienta se consiguen establecer una serie de objetos gráficos, tales como ventanas, botones, barras deslizantes, etc, que sirven para facilitar el uso del método de cálculo interno que componen la aplicación informática.

Más tarde se explican las partes que componen la aplicación informática y como se conectan entre ellas, consiguiendo cada una de ellas y su acción conjunta, el resultado deseado.

Por último se muestran ejemplos mediante figuras, y un ejemplo resuelto para comprobar la validez del método.



5.2. La herramienta *Guide* de Matlab

Una interfaz de uso gráfico o GUI (*Gaphical User Interface*), es una muestra gráfica que contiene dispositivos o componentes, que permiten al usuario realizar una serie de tareas con un programa informático. Para llevar a cabo estas tareas, el usuario de una GUI no tiene que escribir ningún tipo de comando en Matlab. Los componentes de una GUI pueden ser menús, barras de herramientas, botones, listas, gráficos, etc.

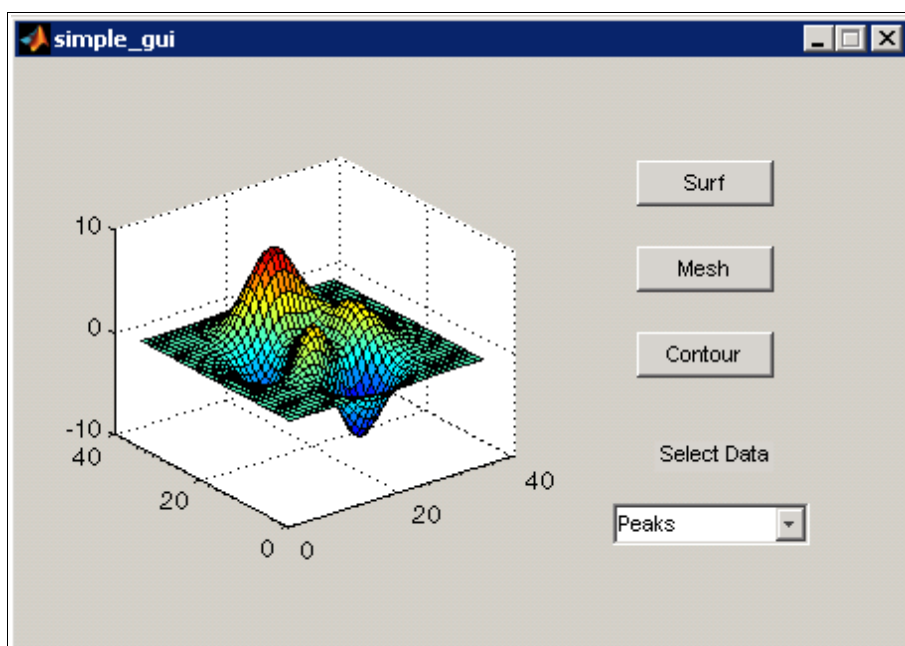


Fig.5.1.Ejemplo de GUI sencilla.

En la figura anterior se muestra un ejemplo de GUI con una gráfica, una serie de botones dispuestos verticalmente y un menú de selección desplegable.

Por defecto, la primera vez que se guarda o ejecuta una GUI, esta se almacena en 2 archivos:

- Un archivo FIG, de extensión *.fig* que contiene una descripción y desarrollo de los componentes, tales como botones, gráficas, paneles, menús, etc.
- Un archivo M, de extensión *.m* que contiene código de inicio y plantillas de algunas llamadas a funciones que son necesarias para el control del comportamiento de la GUI.

El archivo FIG y el archivo M residen en el mismo directorio y cada archivo M en Matlab está asociado con una función.



Para crear una GUI primero tenemos que llamar a la ventana principal de Matlab. Esto se hace clicando sobre el icono de Matlab, que al abrirse nos mostrará esta ventana:

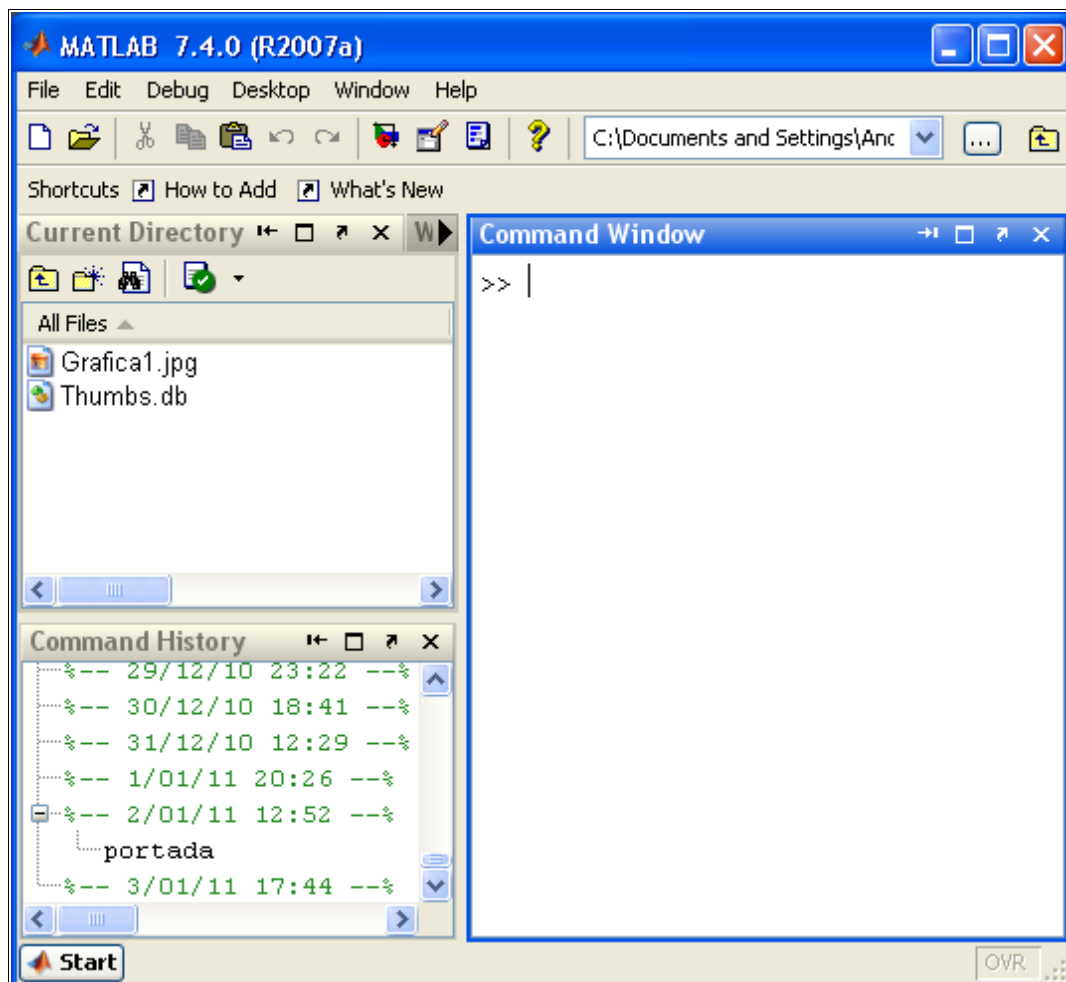


Fig.5.2.Ventana principal de Matlab

En ella se distinguen las siguientes partes:

- Current Directory*: Aquí se sitúan los ficheros con los que trabajamos.
- Command Window*: Lugar donde introducimos comandos para ejecutar sentencias.
- Command History*: Aquí se reflejan las sentencias introducidas anteriormente.



Una vez aquí, pincharemos sobre el siguiente icono:



Fig.5.3.Icono para GUI

Que nos dará acceso a la siguiente pantalla:

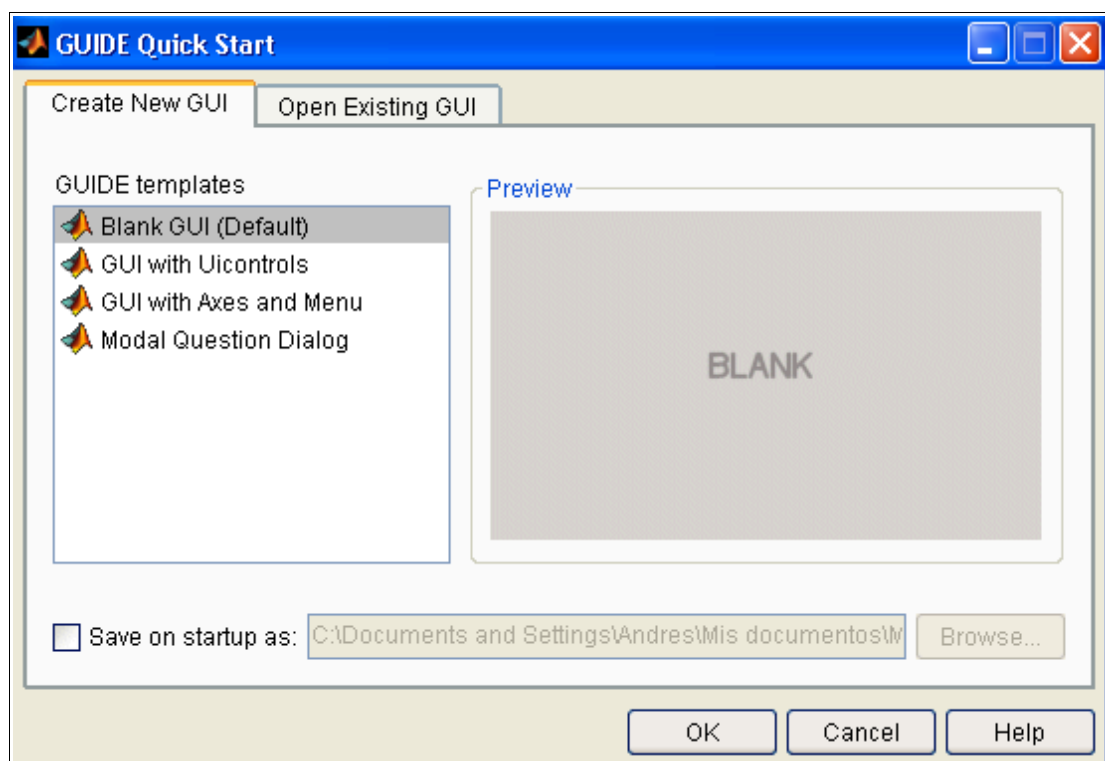


Fig.5.4.Ventana de acceso a GUI

En la que se puede elegir entre abrir una GUI existente, o crear una nueva GUI.



Si seleccionamos la opción por defecto, saltaremos a otra pantalla:

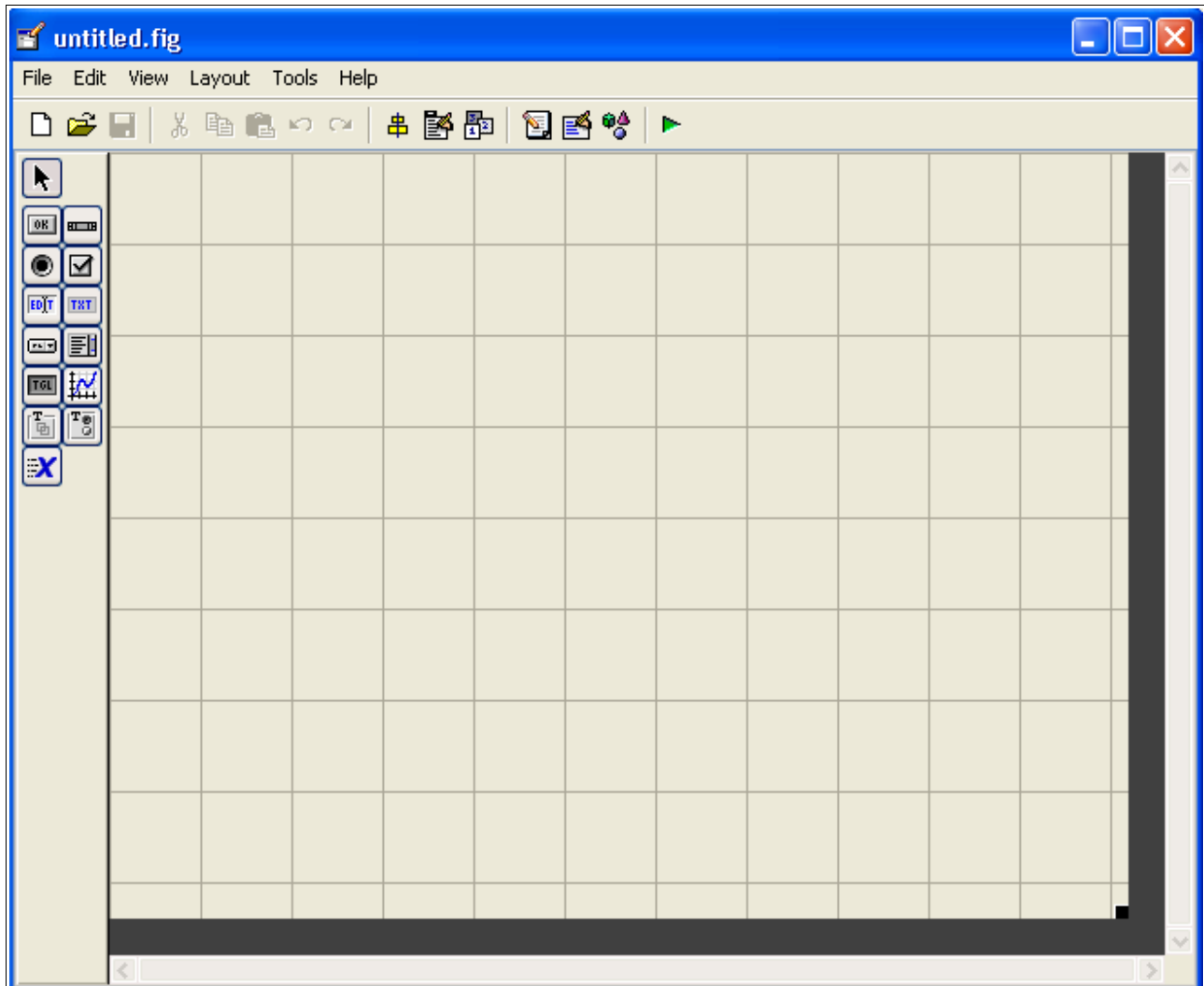


Fig.5.5.Ventana principal de GUI

Aquí es donde se realiza toda la parte gráfica de la GUI, añadiendo todos aquellos elementos que deseemos para el mejor diseño y estética de nuestra GUI. A continuación se enumeran y explican cada uno de los elementos que se pueden crear.

- Botones (*Pushbutton*). Al pulsarlo se ejecutará la función para la que ha sido programado.

- Botones de selección (*Checkboxes*). Tienen la misma función que los anteriores, solo que únicamente con dos posibilidades, activado o desactivado.



-Botones de opción (*Radio buttons*). Son botones excluyentes respecto al resto de botones de la misma naturaleza, es decir, si se selecciona uno de ellos se deselecta el resto.

-Menús de selección desplegables (*Pop-up menus*). Permiten elegir una opción entre varias desplegadas.

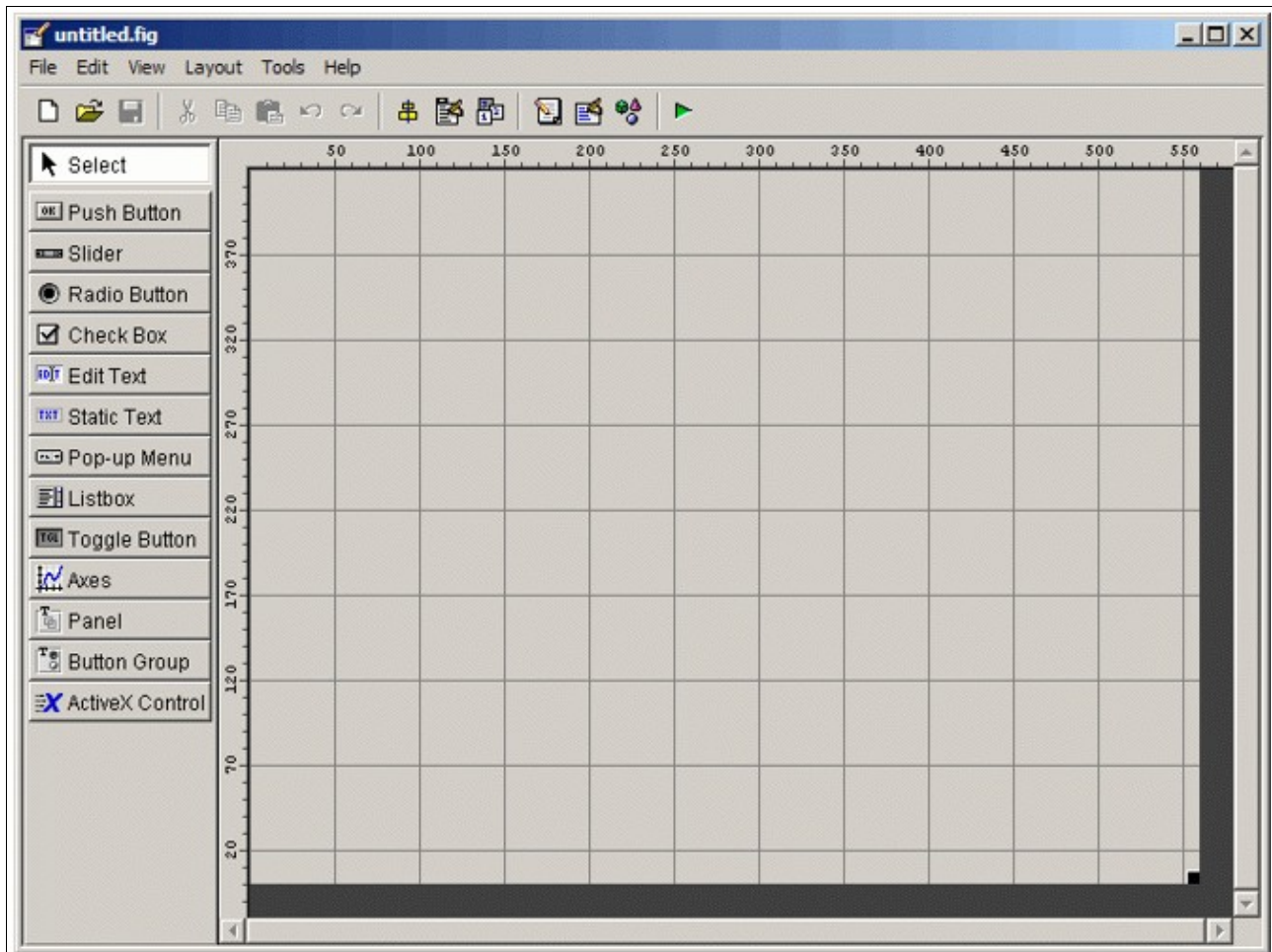


Fig.5.6.Selección de elementos en una GUI.

-Caja de Texto (*Static Textboxes*). Sirven para establecer textos de cualquier clase.

-Caja de Texto Editable (*Edit Text*). Permiten tanto visualizar resultados como introducir variables de entrada.

-Marcos (*Frames*). Son recuadros que permiten separar bloques y dar una mejor apariencia.

-Gráficas (*Axes*). Permiten insertar tanto imágenes como gráficas de todo tipo.



En la parte superior del archivo FIG encontramos el editor de menús, que ha servido para generar, previa programación, la barra de herramientas donde están alojados los menús en la aplicación desarrollada, como se verá mas adelante. Encontramos las siguientes herramientas:

-Herramienta para alinear: De gran utilidad para que los controles queden centrados y ordenados.

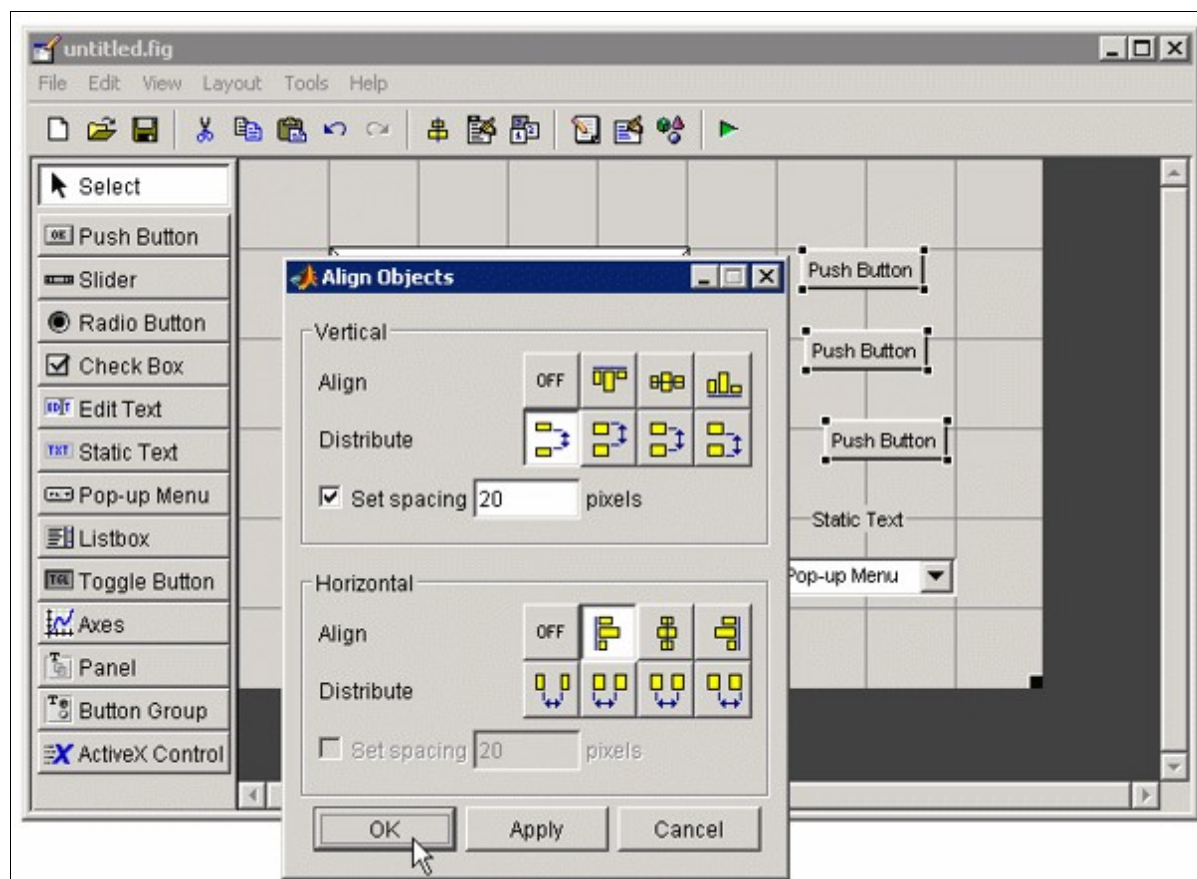


Fig.5.7.Herramienta para alinear objetos en una GUI.

Para usar esta herramienta, los componentes deber ser de la misma familia. Por ejemplo, para alinear los 3 botones de la figura:

- Primero se seleccionan los tres botones
- Se selecciona la herramienta de alineación en el menú herramientas.
- Seleccionamos el espacio y la situación de la alineación.



-Editor de Propiedades. Permite la modificación de todas las propiedades de cada uno de los componentes existentes en la ventana. Es muy útil, ya que nos permite programar de forma intuitiva sin tener que recurrir a la programación con línea de comandos. En la figura siguiente se puede ver un ejemplo:

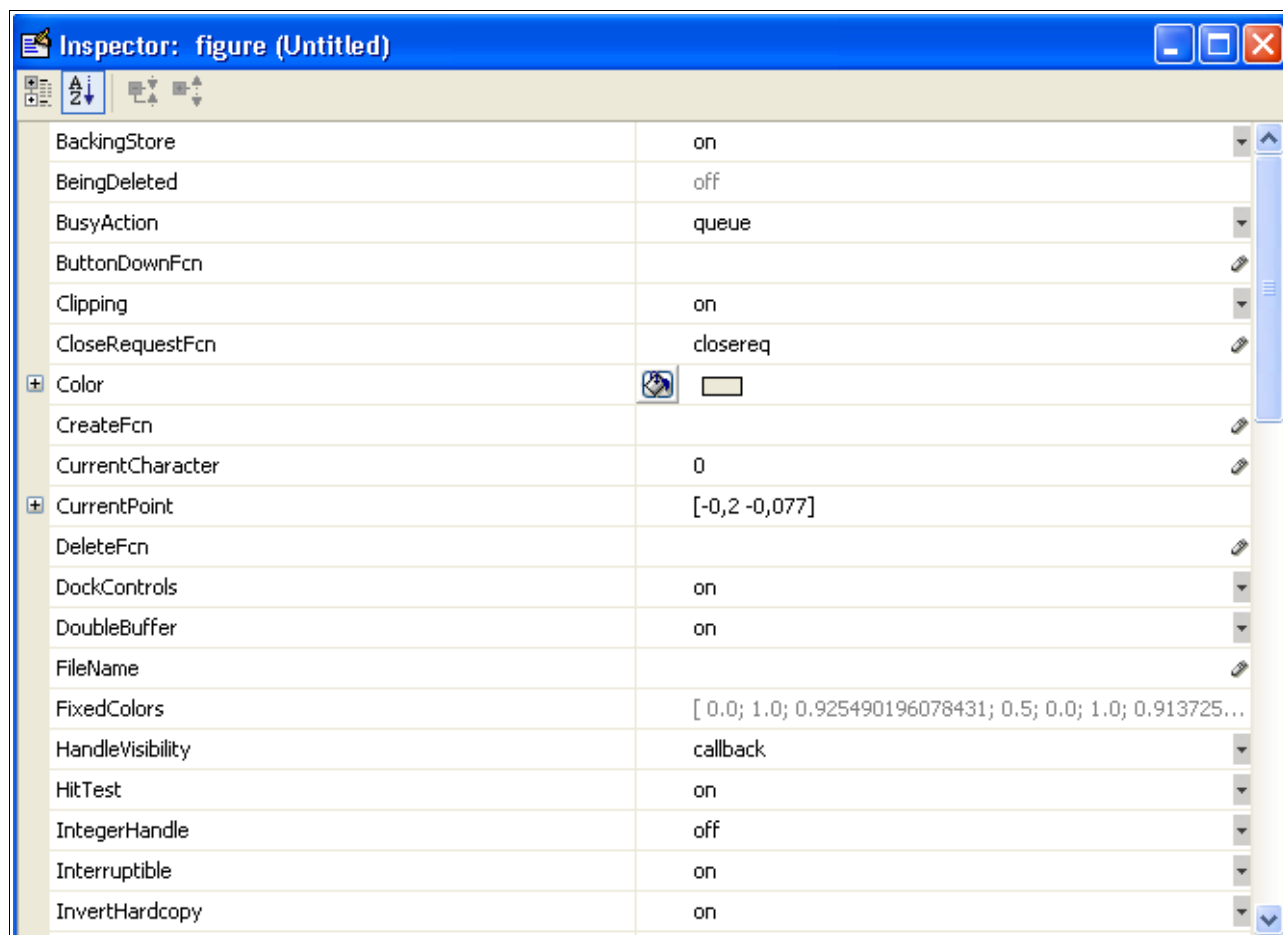


Fig.5.8. Editor de propiedades en una GUI.

Después de usar la herramienta de alineación para colocar los botones, y haber definido cuantos botones y demás elementos va a llevar nuestra GUI, se salva la interfaz en un fichero *.fig que genera automáticamente un fichero tipo *.m en el que se procederá a programar.

Matlab es un programa jerárquico, elemento común a las aplicaciones Windows, que se basa también en relación padre-hijo. Este sistema funciona mediante un objeto superior al resto, el monitor del ordenador, denominado objeto raíz. Una pantalla puede contener una o más ventanas. Cada una de las ventanas puede tener a su vez uno o más objetos de un nivel inferior. Una ventana puede tener también controles, botones, menús ,etc.



A continuación se muestra la jerarquía de Matlab:

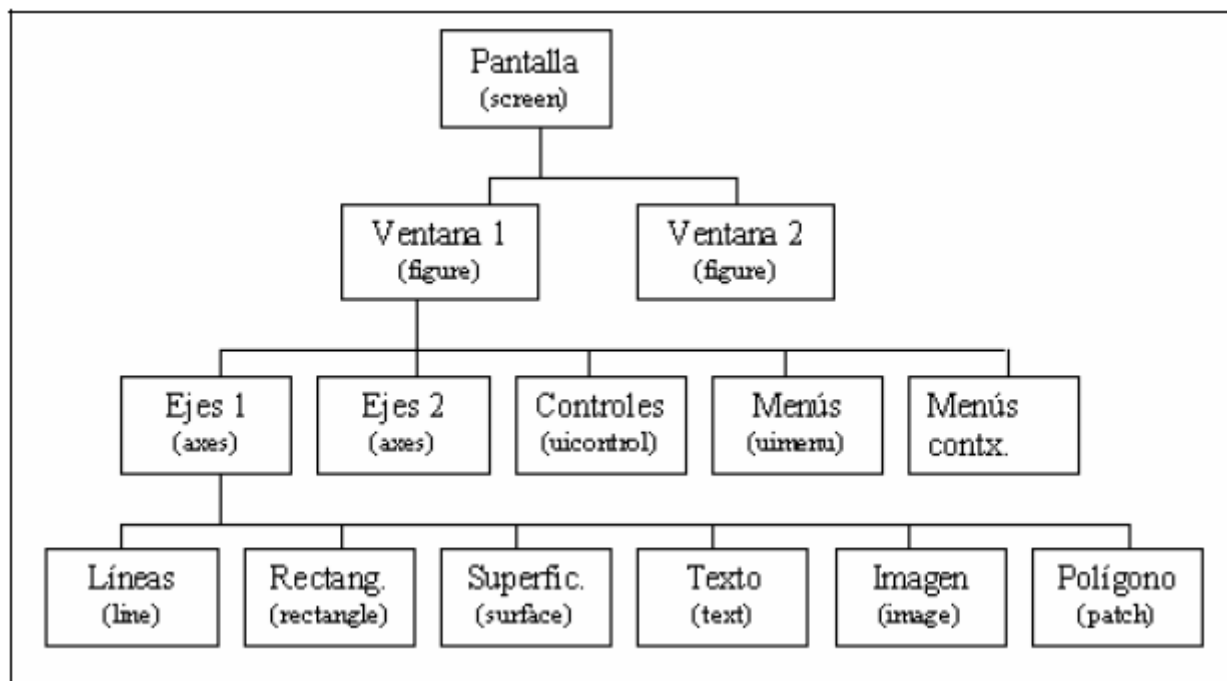


Fig.5.9. Jerarquía en Matlab.

En Matlab, al borrar un objeto, se borran de forma automática todos los objetos que sean descendientes de este.

El diseño de la interfaz de usuario requiere el establecimiento previo de los componentes necesarios para la aplicación, para después programar todas las funciones necesarias para la ejecución del programa.

Las funciones programadas en esta aplicación informática han sido de 2 tipos:

-Funciones intrínsecas a Matlab:

- imag(x): Devuelve la parte imaginaria de x.
- isreal(x): Evalúa si x tiene parte real o no.
- length(x): Calcula la longitud del vector x
- round(x): Redondea el valor de x.
- real(x): Devuelve la parte real de x.



- [valor_max, pos] = max(x): Nos da valor y posición del valor máximo del vector x.
- Plot(): Crea un gráfico a partir de vectores fila o columna.
- Subplot(): Crea tantas gráficas como se quiera en la misma ventana.
- Title(): Inserta título a una gráfica o dibujo.
- Xlabel(): Inserta una etiqueta con el texto requerido en el eje de abscisas.
- Ylabel(): Inserta una etiqueta con el texto requerido en el eje de ordenadas.
- Text(x,y, 'texto'): Introduce un texto en las coordenadas x e y especificadas.
- Grid on/off: Activa la inclusión de una cuadrícula en el dibujo.
- Hold on/off: Permite o impide dibujar varias gráficas en la misma ventana.
- Cla(): Inicia los elementos de una ventana gráfica incluyendo esta.

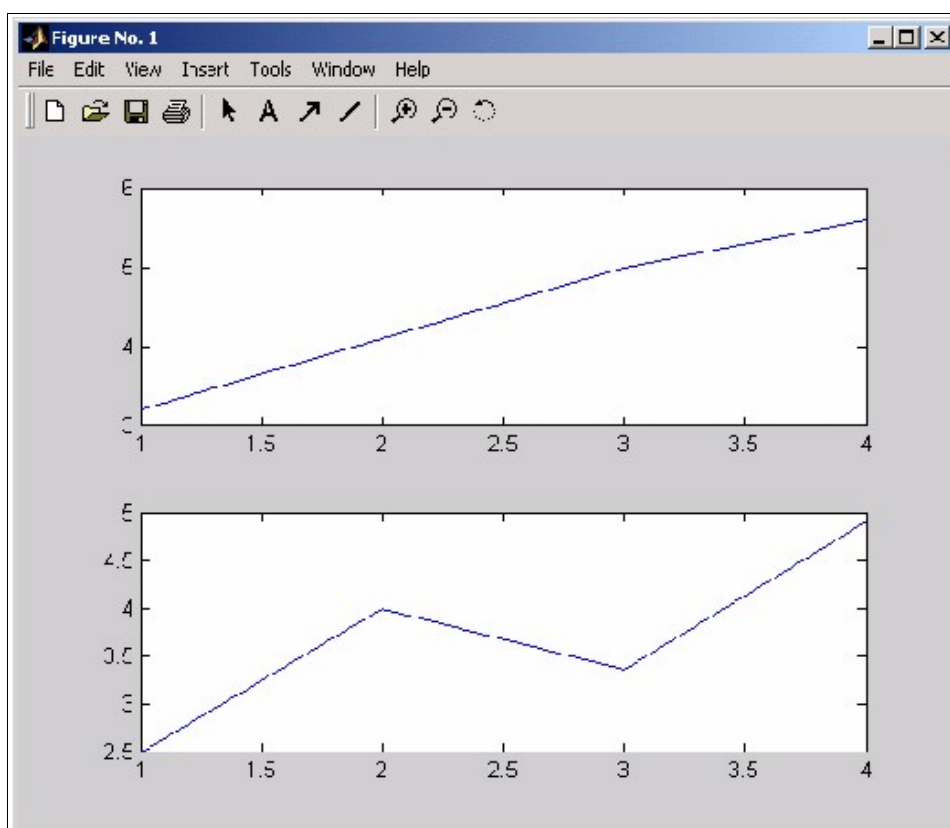


Fig.5.10.Ejemplo del uso de subplot



-Funciones propias de la aplicación:

Estas funciones son creadas a propósito para el desarrollo de la aplicación informática que permita el cálculo de una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado. Estas funciones se explican en el capítulo siguiente, y son funciones para el cálculo del flujo másico o para cálculo de correlaciones del aire o agua, por poner un par de ejemplos.

En el siguiente apartado se muestran cada una de estas funciones y sus interrelaciones correspondientes.

Otras variables utilizadas son:

-Vectores celda: Conocidos como *cell arrays*, vectores de datos. Su función es almacenar datos escalares, matrices o caracteres para la carga de datos.

-Identificadores o punteros: Conocidos como *handle*. Todo objeto en Matlab tiene un único identificador. En ellos se puede grabar información que luego es utilizada y que mientras no se está usando no va a ocupar espacio en la memoria.



5.3. Diagrama de flujo de la aplicación

A continuación se muestra el diagrama de flujo que compone la aplicación, con la interrelación entre cada una de las funciones que la componen.

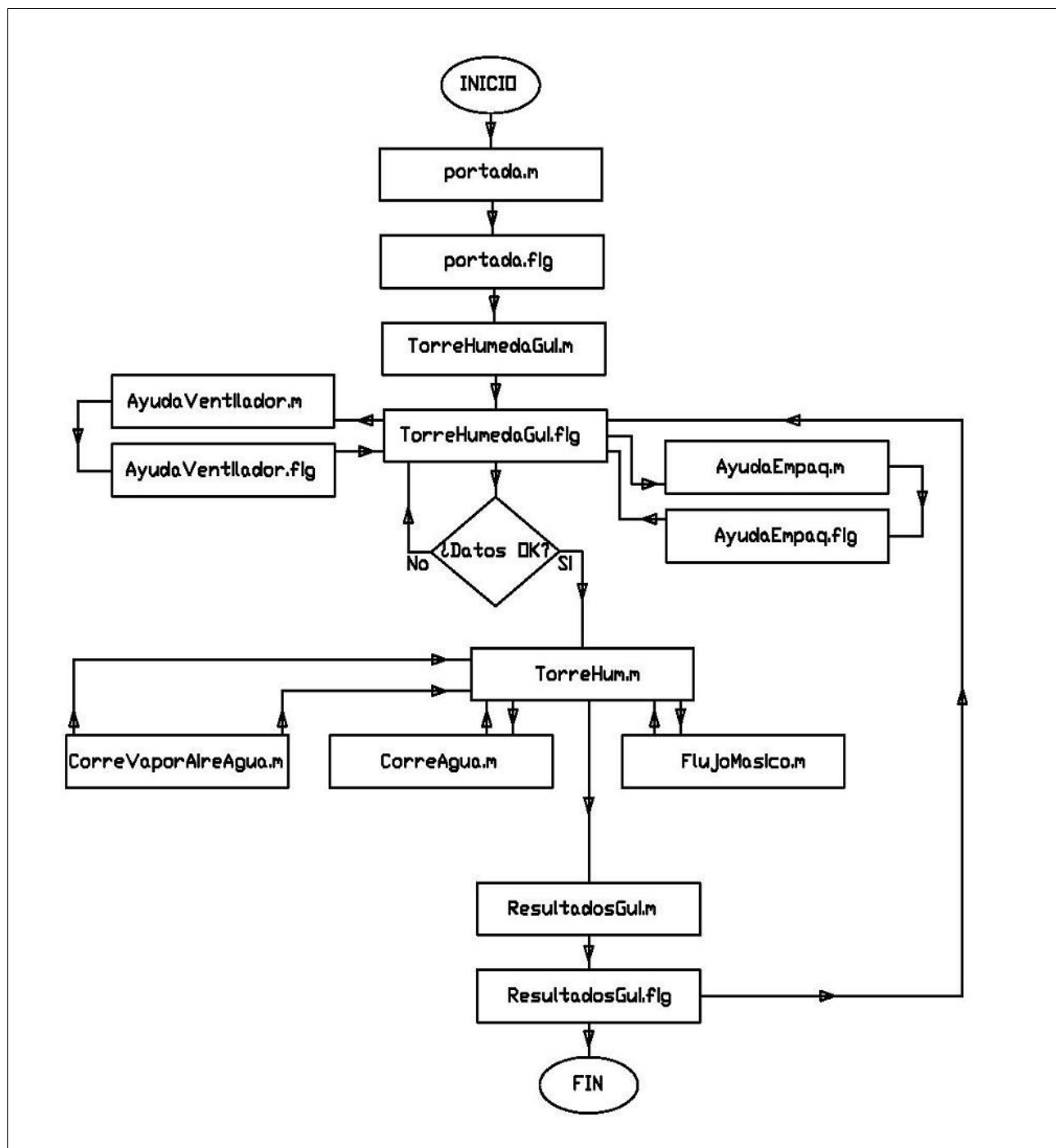


Fig.5.11. Diagrama de flujo de la aplicación.



5.4. Interfaz gráfica de la aplicación.

A continuación se va a describir la parte gráfica de la aplicación realizada para el cálculo del comportamiento de una torre de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado.

A la hora de iniciar este programa, deberemos tener instalado Matlab 7.0. o superior, ejecutar la aplicación y dirigirse a la ventana *Current Directory* anteriormente descrita, y abrir la carpeta que contiene los ficheros que conforman el programa.

La llamada a la primera función se hará desde la línea de comandos. Matlab ofrece al posibilidad de crear un archivo ejecutable, pero se ha descartado esta opción ya que dicho ejecutable presenta fallos dependiendo de la versión de Matlab que se use.

Cuando la carpeta está abierta, desde la línea de comandos o *Command Window* tecleando “portada”, la aplicación arranca con la ventana de presentación:

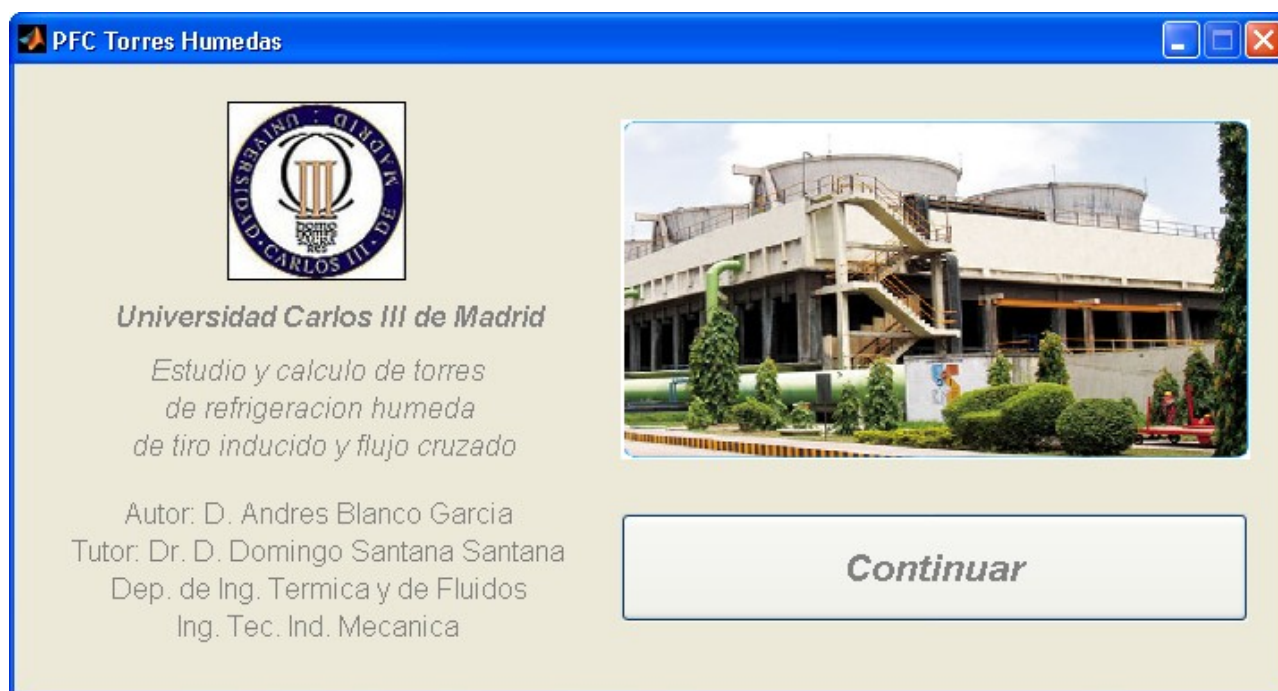


Fig.5.12.Portada de la aplicación.



Al pulsar el botón *Continuar*, se cierra la ventana mostrada en la figura anterior y se abre la siguiente ventana, que es la de introducción y elección de los datos de partida.

Datos de la Torre de Refrigeración a estudio.

Archivo Ayuda

Datos de Agua a la entrada

Caudal Masico (kg/s):

Temperatura de Entrada (K):

Datos del Aire a la entrada

Temperatura de Bulbo Humedo (K):

Temperatura (K):

Presion Atmosferica (N/m²):

Datos de la Torre

H3 Altura de entrada (m):

W3 Anchura de entrada (m):

ATD (m):

H6 Altura del Ventilador (m):

H7 Altura de salida del difusor (m):

Datos del Empaquetamiento

Empaquetamiento: Doron V-bar Tipo 1

Datos del Ventilador-Difusor

Modelo: Modelo 40H-20

Velocidad (rpm):

Es conveniente mirar la Ayuda

CALCULAR

Fig.5.13.Ventana para introducción de datos de partida.



A continuación pasaremos a describir cada uno de los menús que complementan a la ventana anteriormente mostrada.

En primer lugar encontramos la barra de herramientas desde donde accedemos al menú Archivo y Ayuda.

Menú Archivo. A continuación se muestra el menú archivo:

Abrir	Ctrl+O
Guardar como...	Ctrl+S
Salir	Ctrl+Q

Fig.5.14.Archivo.

Compuesto como vemos de tres elementos, Abrir, Guardar como y Salir.

-Abrir. Permite abrir archivos *.mat*, donde se encuentran guardados los datos que caracterizan a la torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado que queramos estudiar.

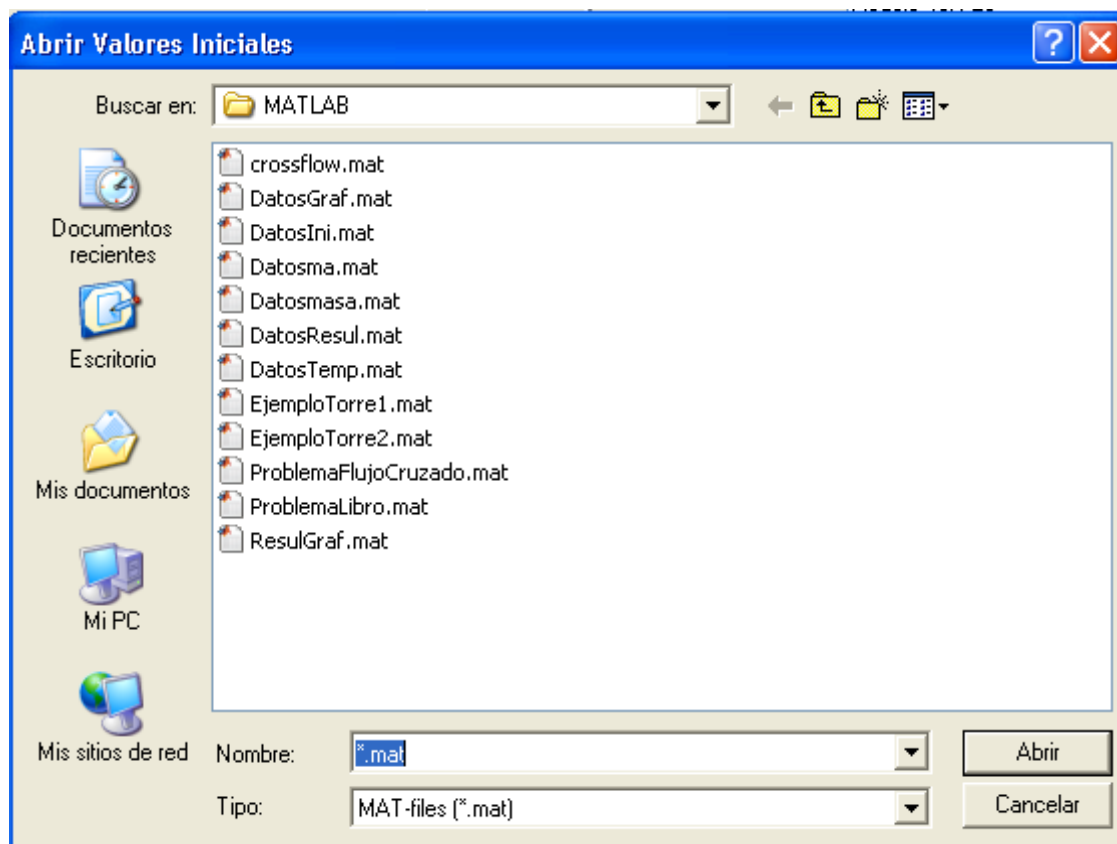


Fig.5.15.Ventana para cargar datos.



-Guardar como: Nos permite guardar datos de la torre que vamos a estudiar antes de proceder al cálculo.

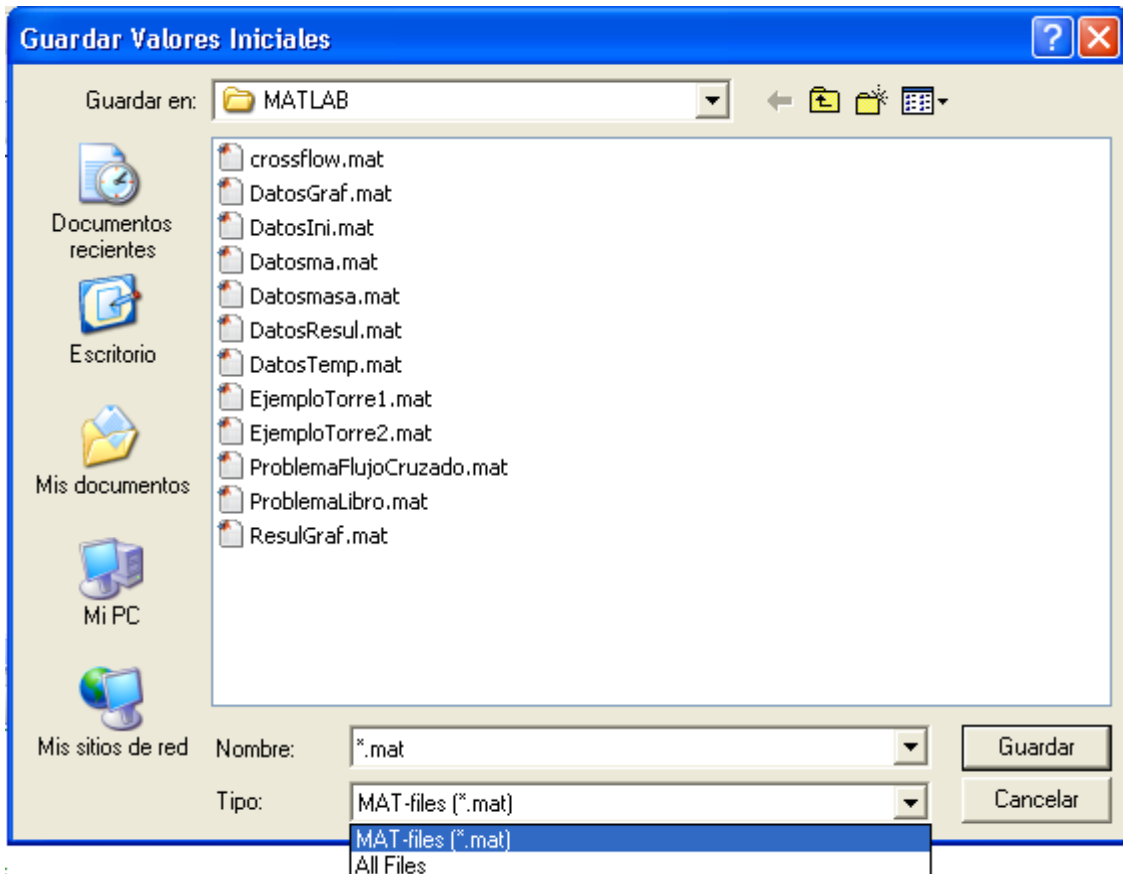


Fig.5.16.Ventana para guardar datos.

-Salir: Nos permite abandonar la aplicación y volver a windows.



-Menú Ayuda

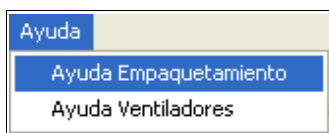


Fig.5.17.Ayuda

-Ventiladores: Cuando pulsamos sobre este menú se despliega una ventana en la que se exponen algunas consideraciones sobre flujo másico en ventiladores.

AyudaVentilador

Características de los ventiladores

Ventilador	Nº Palas	Diámetro (m)	Diámetro carcasa (m)	Diámetro disco de sellado (m)	Rango de presiones (Pa)	Rango de caudales (kg/s)
40H-20	20	12,19	12,31	4,06	610-210	1960-1140
36H-16	16	10,97	11,08	4,06	195-580	1460-820
20H-4	4	6,09	6,15	1,62	47-56	250-175
12H-8	8	3,65	3,69	0,96	17-58	60-25
Problema Kröger	8	9,5	9,52	-	2-275	1210-200

- Las pérdidas por obstáculos se calculan según las expresiones:

$$K_{up} = 2\Delta p_{up}/(\rho v^2) = 2\rho\Delta p_{up}/(m_a/A_e)^2 = f(x/d_c, A_{ob}/A_\eta)$$

$$K_{do} = 2\Delta p_{do}/(\rho v^2) = 2\rho\Delta p_{do}/(m_a/A_e)^2 = f(x/d_c, A_{ob}/A_c)$$

Para la aplicación se estima que $K_{ud}=K_{\phi}+K_{db}=0,5$

- Las pérdidas en la embocadura de entrada son $K_{e1}=0,0$ por ser del tipo Bellmouth.
- La altura del difusor queda fijada con la elección de H_6 y H_7 , esto es: $H_{d1}=H_7-H_6$

Volver

Fig.5.18.Ventana de ayuda a ventiladores.



-**Empaquetamientos:** Aquí se muestra el valor de los coeficientes que caracterizan a cada uno de los empaquetamientos utilizados en la aplicación para el cálculo, así como información acerca de las pérdidas en el empaquetamiento.

Características de los Empaquetamientos

Características de los tipos de Empaquetamiento.

Cada tipo de Empaquetamiento ha sido caracterizado experimentalmente por el método de Merkel en donde, tanto la transferencia de masa como las pérdidas, siguen las siguientes ecuaciones por longitud de empaquetamiento:

$$h_d a_{fi} / G_w = \frac{h_d a_{fi} (ATD \times width)}{m_w} = a_d (G_w / G_a)^{-b_d}$$

$$K_{fi1} = a_p G_w^{b_{pa}} G_a^{b_{pb}}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de a_d , b_d , a_p y b_p para los distintos tipos de empaquetamientos usados en la aplicación:

Empaquetamiento	a_d	b_d	a_p	b_{pa}	b_{pb}
Doron V-bar Tipo 1	0,27	0,56	0,75	0,66	-0,73
Doron V-bar Tipo 2	0,24	0,38	0,99	0,72	-0,82
Ecodyne T-bar Tipo1	0,26	0,34	0,11	1,3	-0,22
Ecodyne T-bar Tipo2	0,25	0,35	0,2	0,89	-0,06
Wood Lath Tipo 1	0,27	0,45	1,44	0,76	-0,8
Wood Lath Tipo 2	0,36	0,57	1,83	0,71	-0,59
Marley Alpha-bar	0,3	0,05	1,82	0,71	-0,85

Volver

Fig.5.19.Ventana de ayuda a empaquetamientos.

Una vez descritos los menús accesibles en la ventana de introducción de datos, describiremos ahora el resto de la ventana.

Como se vio en la figura anterior para la ventana de introducción de datos, la ventana está dividida en diversos cuadros, donde se introducirán valores para los datos de partida del problema para el cálculo de una torre de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado.



-Datos del Agua a la entrada.

<i>Datos de Agua a la entrada</i>	
Caudal Masico (kg/s):	<input type="text"/>
Temperatura de Entrada (K):	<input type="text"/>

Fig.5.20.Datos partida agua

-Datos del aire a la entrada.

<i>Datos del Aire a la entrada</i>	
Temperatura de Bulbo Humedo (K):	<input type="text"/>
Temperatura (K):	<input type="text"/>
Presion Atmosferica (N/m ²):	<input type="text"/>

Fig.5.21.Datos partida aire.

-Datos de la torre.

<i>Datos de la Torre</i>	
H3 Altura de entrada (m):	<input type="text"/>
W3 Anchura de entrada (m):	<input type="text"/>
ATD (m):	<input type="text"/>
H6 Altura del Ventilador (m):	<input type="text"/>
H7 Altura de salida del difusor (m):	<input type="text"/>

Fig.5.22.Datos partida torre.

-Datos del empaquetamiento y pérdidas en soportes del empaquetamiento y eliminador de gotas.

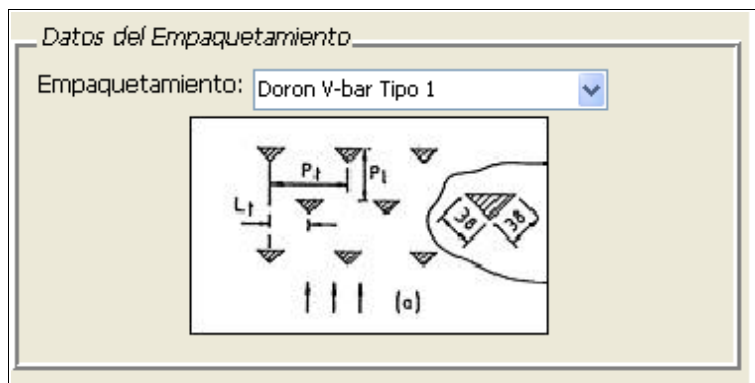


Fig.5.23.Datos partida empaquetamiento.

Dependiendo del empaquetamiento preferido por el usuario, se desplegará una imagen diferente mostrando un ejemplo.



Fig.5.24.Menú tipos de empaquetamiento.

En la figura anterior se muestra el menú desplegable con el que podemos elegir el tipo de empaquetamiento que el usuario prefiera. Existen 7 tipos de empaquetamiento diferentes y sus respectivas características se muestran en la ayuda.

Los coeficientes que caracterizan a cada tipo de empaquetamiento, han sido obtenidos de la figura 3.25. y son desarrollados mediante el método de Merkel.



-Datos del Ventilador-Difusor

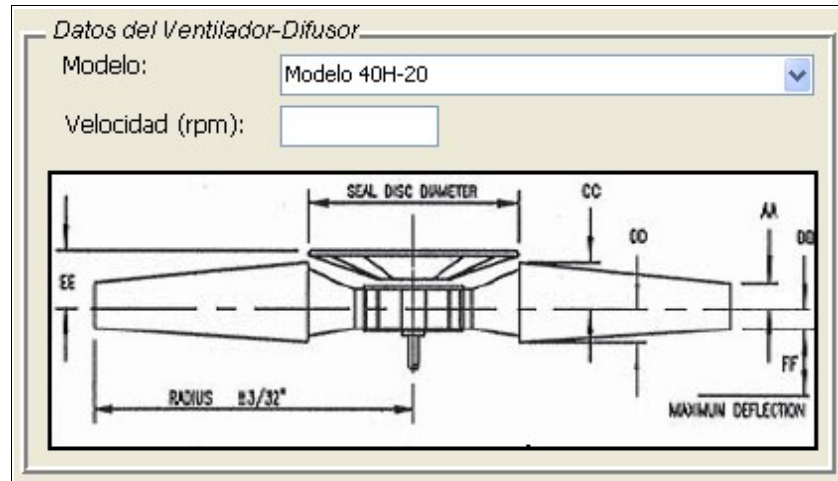


Fig.5.25.Datos de partida ventilador.

A continuación se muestra el menú desplegable donde podemos elegir entre 4 de los ventiladores disponibles además del ventilador usado en el problema de ejemplo.

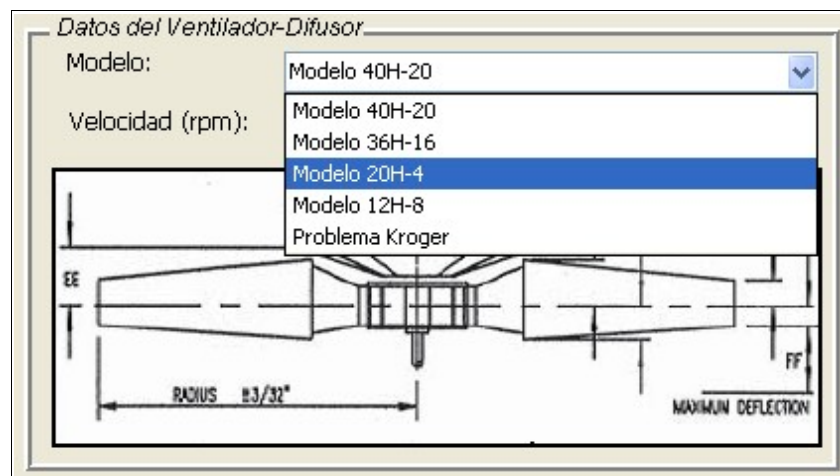


Fig.5.26.Menú tipos de ventilador.

Al elegir uno de los ventiladores, la imagen inferior cambiará para mostrar un alzado de las aspas del ventilador.

También se muestra en esta pantalla, una representación de una torre de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado.



Una vez introducidos los datos, se procede a pulsar el botón *Calcular*. Si no se ha completado la totalidad de los campos, o si se ha hecho de modo incorrecto, aparecerá una ventana de aviso y la aplicación no podrá seguir. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de este aviso.

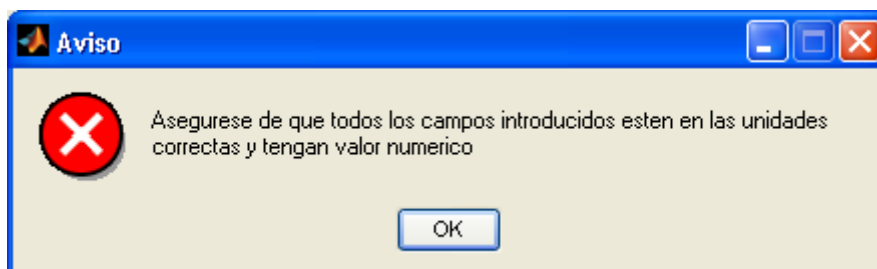


Fig.5.27. Aviso de campos incorrectos.

Si los datos introducidos son correctos, la aplicación procede al cálculo, y muestra la ventana de resultados.

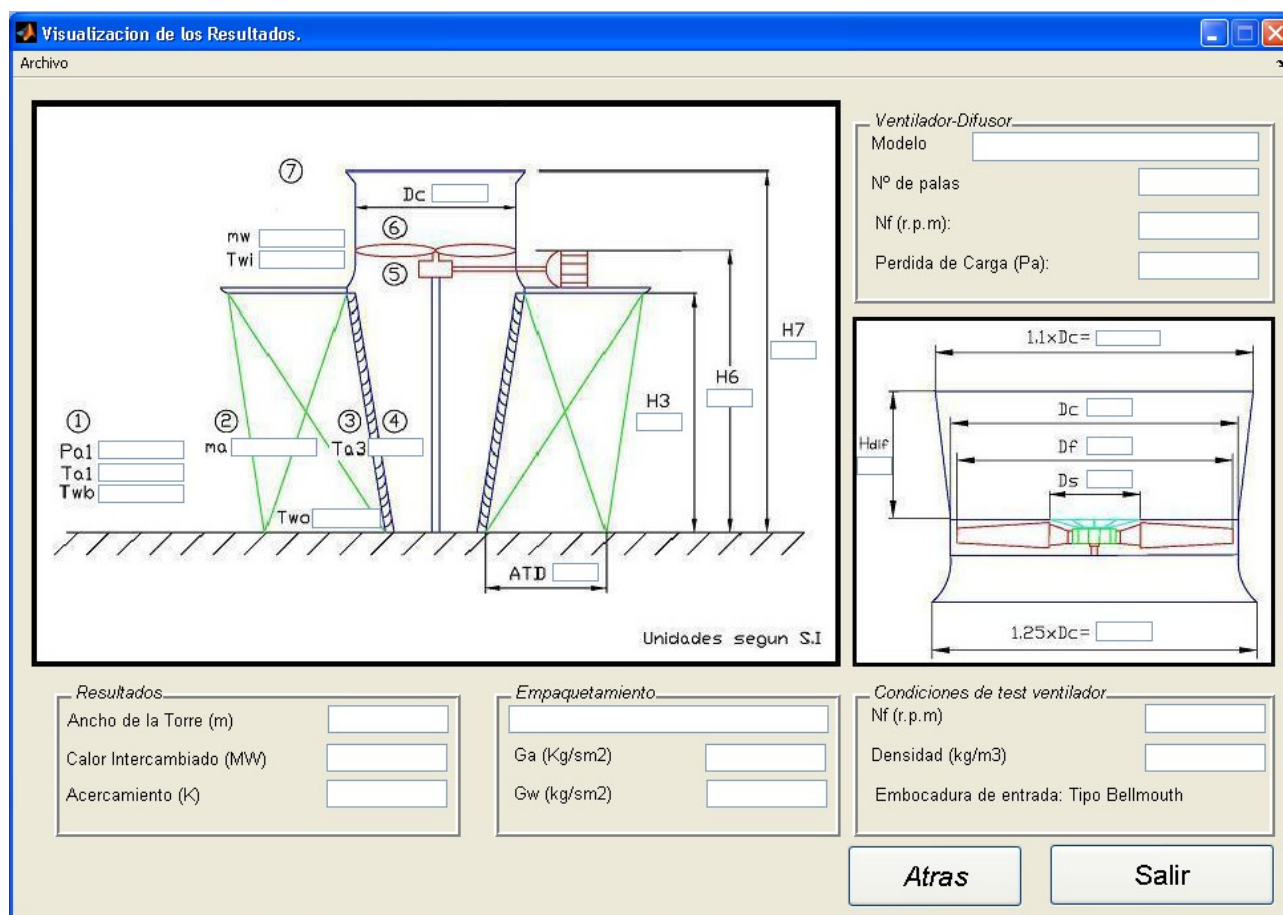


Fig.5.28. Ventana de visualización de resultados.



La ventana de resultados se divide en varias zonas:

-Resultados de la torre.

Esta zona se compone de un dibujo de la torre con sus principales características, tales como *Air Travel Distance* y las alturas de empaquetamiento, ventilador y salida. La altura del difusor será la diferencia entre H6 y H7.

También podemos ver las propiedades del agua y aire antes y después del paso por el empaquetamiento, así como los respectivos flujos másicos.

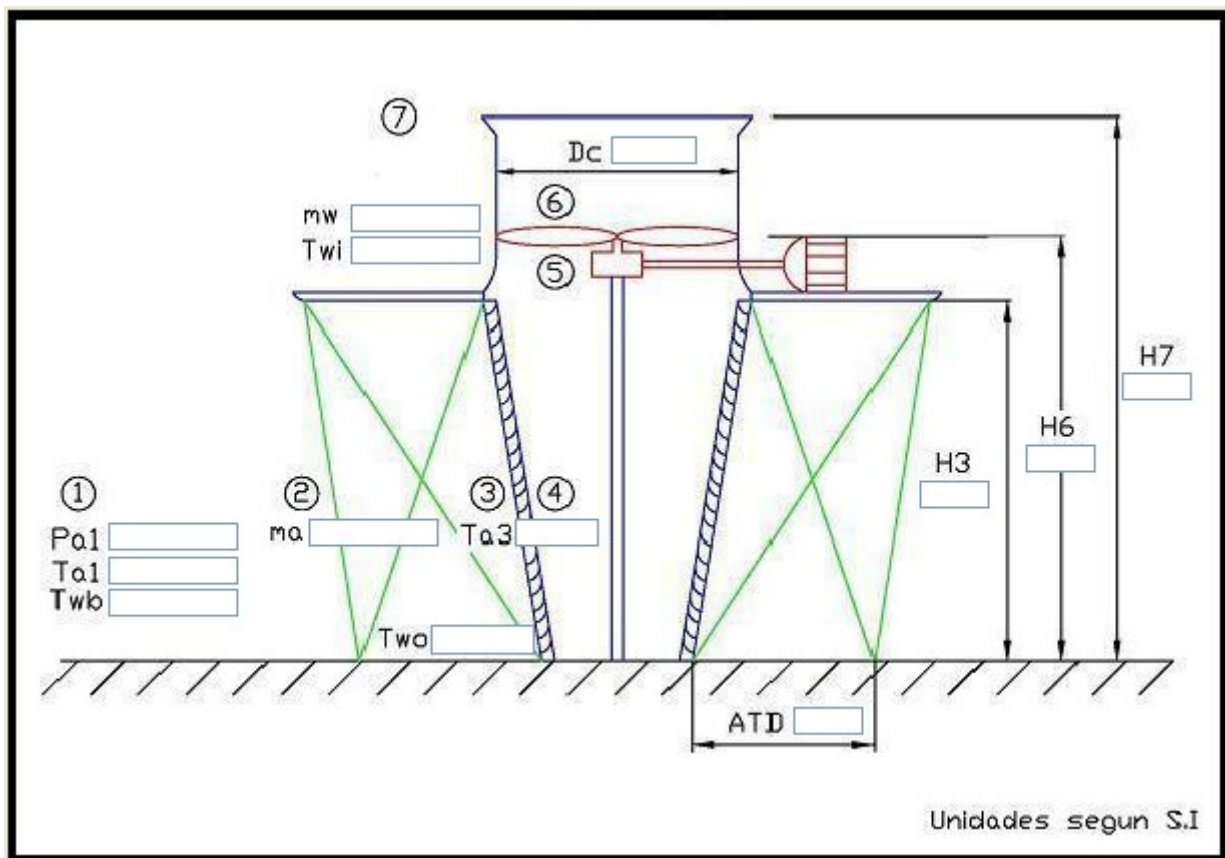


Fig.5.29.Ventana de resultados de la torre.



Por último podemos observar resultados importantes como el calor intercambiado y el acercamiento de la torre:

Resultados

Ancho de la Torre (m)	<input type="text"/>
Calor Intercambiado (MW)	<input type="text"/>
Acercamiento (K)	<input type="text"/>

Fig.5.30.Ventana de resultados

-Resultados del empaquetamiento.

En esta ventana podemos observar los principales resultados para el empaquetamiento elegido.

Empaquetamiento

<input type="text"/>	
Ga (Kg/sm2)	<input type="text"/>
Gw (kg/sm2)	<input type="text"/>

Fig.5.31.Resultados de empaquetamiento

-Resultados del ventilador-difusor.

Este conjunto de ventanas en las que podemos observar los principales resultados para el grupo ventilador-difusor, se divide a su vez en 3 subventanas, que son:

-Ventilador-difusor.

Donde observamos los principales datos para el ventilador elegido en la ventana anterior.

Ventilador-Difusor

Modelo	<input type="text"/>
Nº de palas	<input type="text"/>
Nf (r.p.m):	<input type="text"/>
Pérdida de Carga (Pa):	<input type="text"/>

Fig.5.32.Resultados del ventilador



Como podemos observar, esta ventana nos proporciona datos sobre el modelo y número de palas, como recordatorio al modelo elegido por el usuario, así como la velocidad de rotación y la pérdida de carga vencida por el ventilador.

También aquí se nos otorgan datos geométricos del conjunto ventilador-difusor:

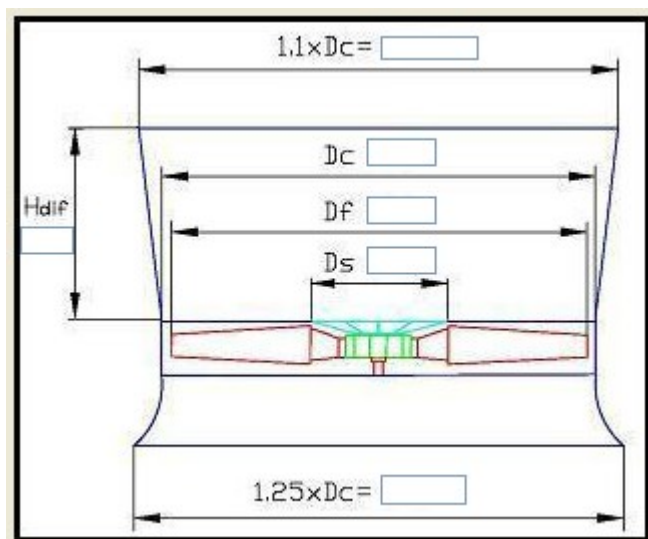


Fig.5.33.Geometría de ventilador-difusor.

Datos geométricos como el diámetro del ventilador, diámetro de la carcasa o camisa y diámetro del disco de sellado.

También se proporcionan datos geométricos del difusor, como la altura o diámetros de salida y entrada.

-Ventana de condiciones de test del ventilador.

Aquí se nos proporcionan datos sobre las principales propiedades del aire que atraviesa el ventilador y el tipo de embocadura de entrada utilizada en los ensayos de los que se han extraído las curvas características.

Condiciones de test ventilador	
Nf (r.p.m)	<input type="text"/>
Densidad (kg/m ³)	<input type="text"/>
Embocadura de entrada: Tipo Bellmouth	

Fig.5.34.Condiciones de test.



En el menú archivo se muestran cuatro submenús:

-**Guardar Resultados.** Mediante el cual podremos guardar los resultados obtenidos en un archivo *.mat, para su posterior uso.

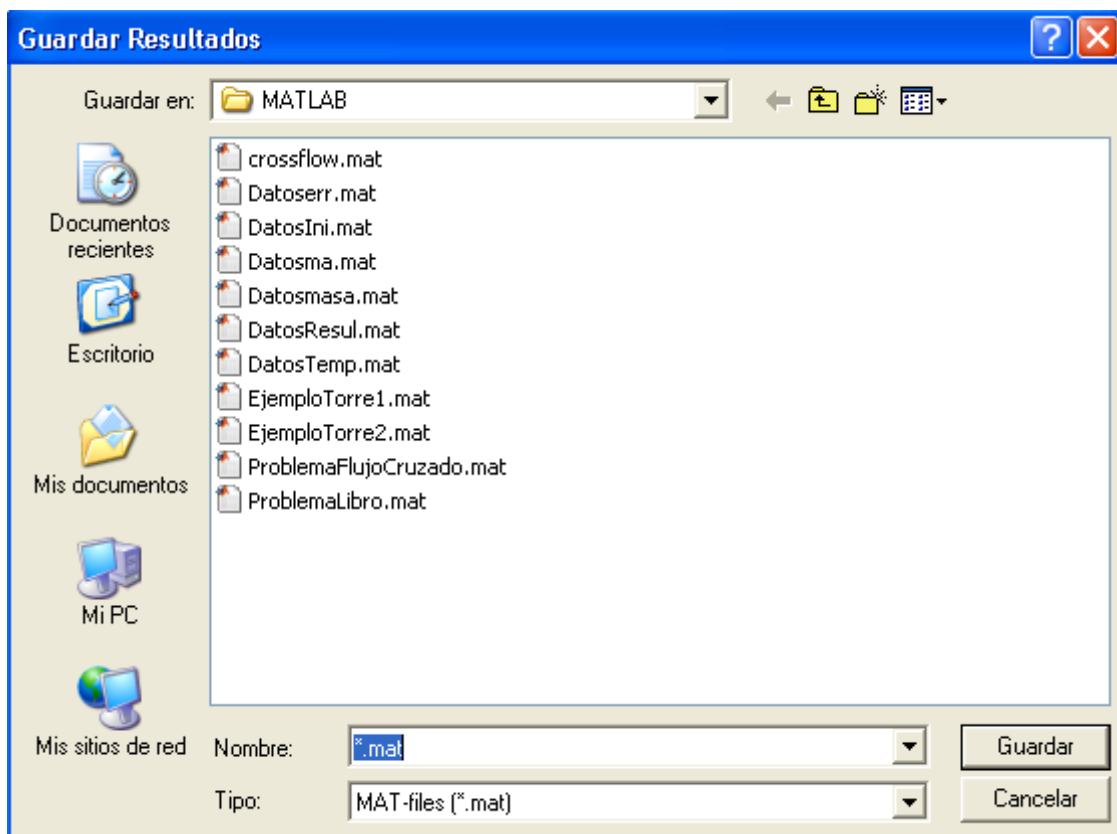


Fig.5.35.Ventana para guardar resultados

-**Imprimir.** Esta opción nos permite imprimir en papel la ventana de visualización de resultados. Dependiendo de la versión de Matlab que estemos utilizando, la calidad será diferente. Para obtener una calidad adecuada, se recomienda imprimir a un archivo PDF.

-**Atrás.** Este menú nos permite, al igual que el botón existente en la ventana, volver a la ventana de introducción de datos, bien para variar o confirmar alguno de los datos.

-**Salir.** Podemos usar este menú o el botón de la pantalla para abandonar la aplicación.



Si para los datos introducidos, no se encontrara una solución, saldría un mensaje así:

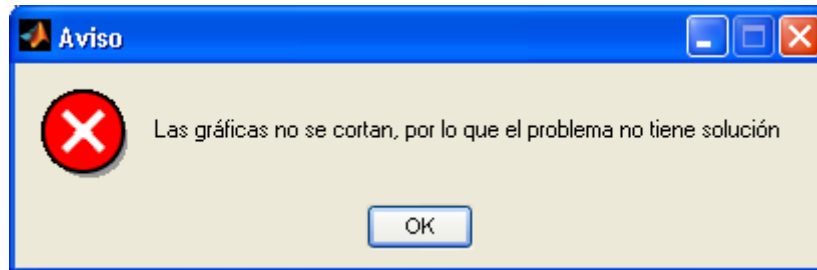


Fig.5.36.Aviso de no solución

O de igual manera si para los datos introducidos el ventilador se hallara cerca de las condiciones de *stall* o agotamiento, saldría un mensaje como el siguiente:

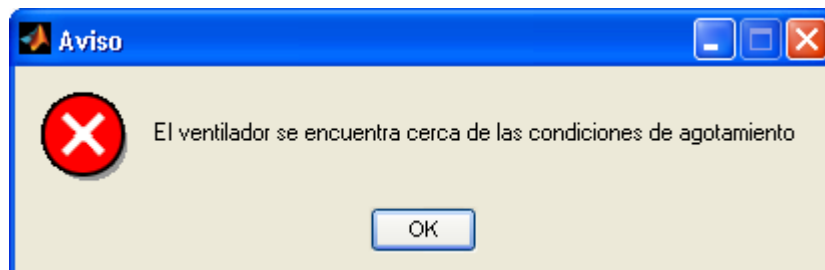


Fig.5.37.Aviso de condiciones de agotamiento



5.5. Ejemplo de uso del programa.

En este apartado se desarrollará un ejemplo práctico del uso del programa anteriormente explicado. Para ello nos valdremos del ejemplo usado en el apartado 4.5 usado para la comprobación del método. Mas tarde cambiaremos algunas variables y veremos como afectan al uso y rendimiento de la torre de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado.

Datos de la geometría de la torre:

$$-H_3 = 11 \text{ m.}$$

$$-H_6 = 12 \text{ m.}$$

$$-H_7 = 15 \text{ m.}$$

$$-ATD = 4,57 \text{ m.}$$

$$-W_3 = 11 \text{ m.}$$

Datos del empaquetamiento:

Material: Heavy-duty, Doron V-bar 101,6x203,2 mm.

$$-a_d = 0,268.$$

$$-b_d = 0,56.$$

$$-a_p = 0,751.$$

$$-b_{pa} = 0,66.$$

$$-b_{pb} = -0,73.$$

Coeficiente de pérdidas de los soportes del empaquetamiento basado en condiciones del empaquetamiento:

$$-K_{fsfi} = 0,5.$$

Coeficiente de pérdidas de corriente abajo y eliminador de gotas basadas en condiciones del flujo de corriente abajo.

$$-K_{de} = 3.$$



Datos del agua a la entrada:

- $m_w = 1000 \text{ kg/s}$.

- $T_{wi} = 317,15 \text{ K}$.

Datos del aire a la entrada:

- $T_{a1} = 306,65 \text{ K}$.

- $T_{wb} = 298,15 \text{ K}$.

- $P_{a1} = 101000 \text{ N/m}^2$.

Datos del ventilador y difusor:

- $D_f = 9,5 \text{ m}$.

- $D_c = 9,5265 \text{ m}$.

- $N_f = 118 \text{ (r.p.m)}$.

- $H_{dif} = 3 \text{ m}$.

- $\rho_t = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

- $N_{ft} = 120 \text{ r.p.m}$.

-Embocadura de entrada tipo Bellmouth.

- $\Delta p_{vent} = 299,903 + 40,0071 \times 10^{-3} Q_{ft} - 96,5087 \times 10^{-6} Q_{ft}^2 - 152,2243 \times 10^{-9} Q_{ft}^3$
(N/m^2).



Con los datos de partida, iniciamos el programa:

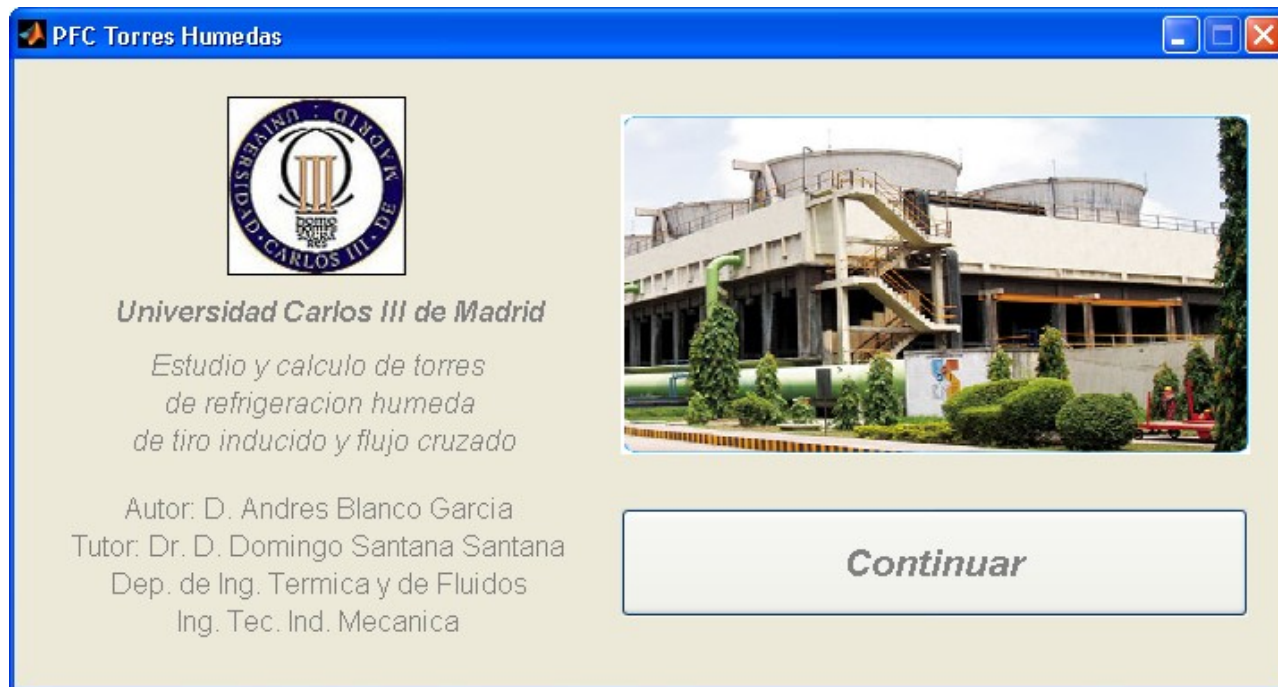


Fig.5.38.Portada

Pulsamos continuar y cargamos los datos:

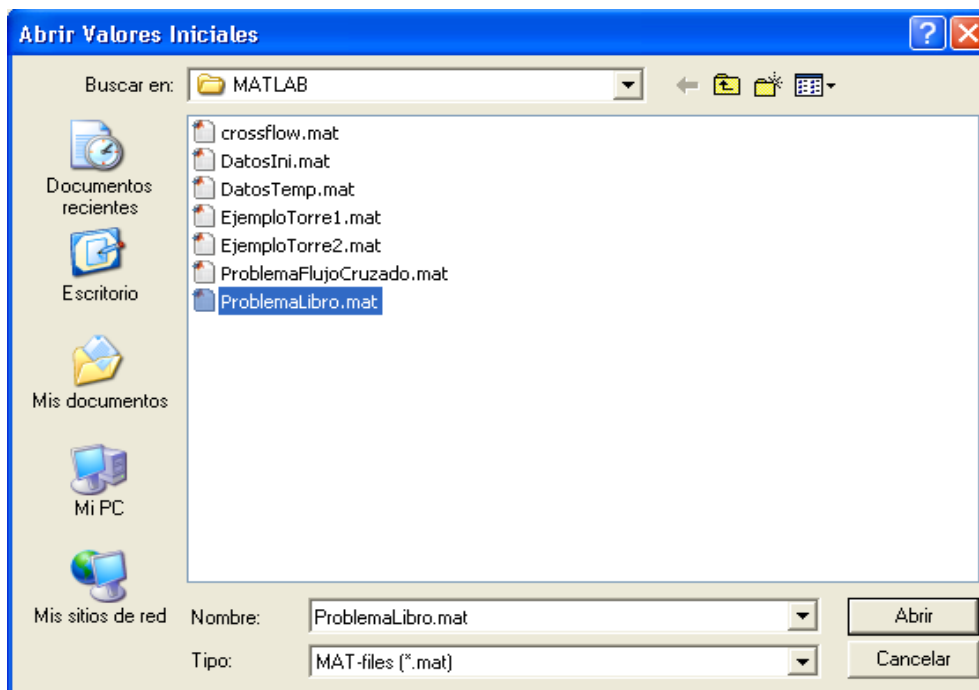


Fig.5.39.Carga de datos.



Datos de la Torre de Refrigeración a estudio.

Archivo Ayuda

Datos de Agua a la entrada

Caudal Masico (kg/s): 1000

Temperatura de Entrada (K): 317.15

Datos del Aire a la entrada

Temperatura de Bulbo Humedo (K): 298.15

Temperatura (K): 306.65

Presion Atmosferica (N/m²): 101000

Datos de la Torre

H3 Altura de entrada (m): 11

W3 Anchura de entrada (m): 11

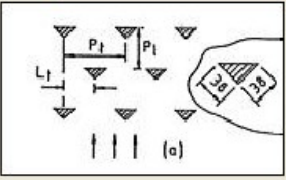
ATD (m): 4.57

H6 Altura del Ventilador (m): 12

H7 Altura de salida del difusor (m): 15

Datos del Empaquetamiento

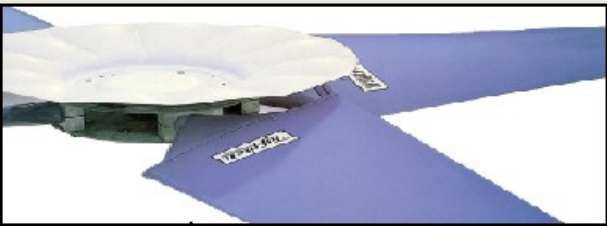
Empaquetamiento: Doron V-bar Tipo 1

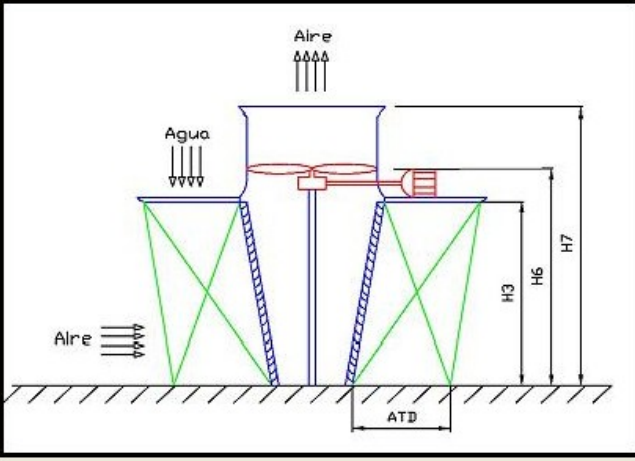


Datos del Ventilador-Difusor

Modelo: Problema Kroger

Velocidad (rpm): 118





Es conveniente mirar la Ayuda

CALCULAR

Fig.5.40.Introducción de datos.

Pulsamos el botón Calcular para obtener los resultados.

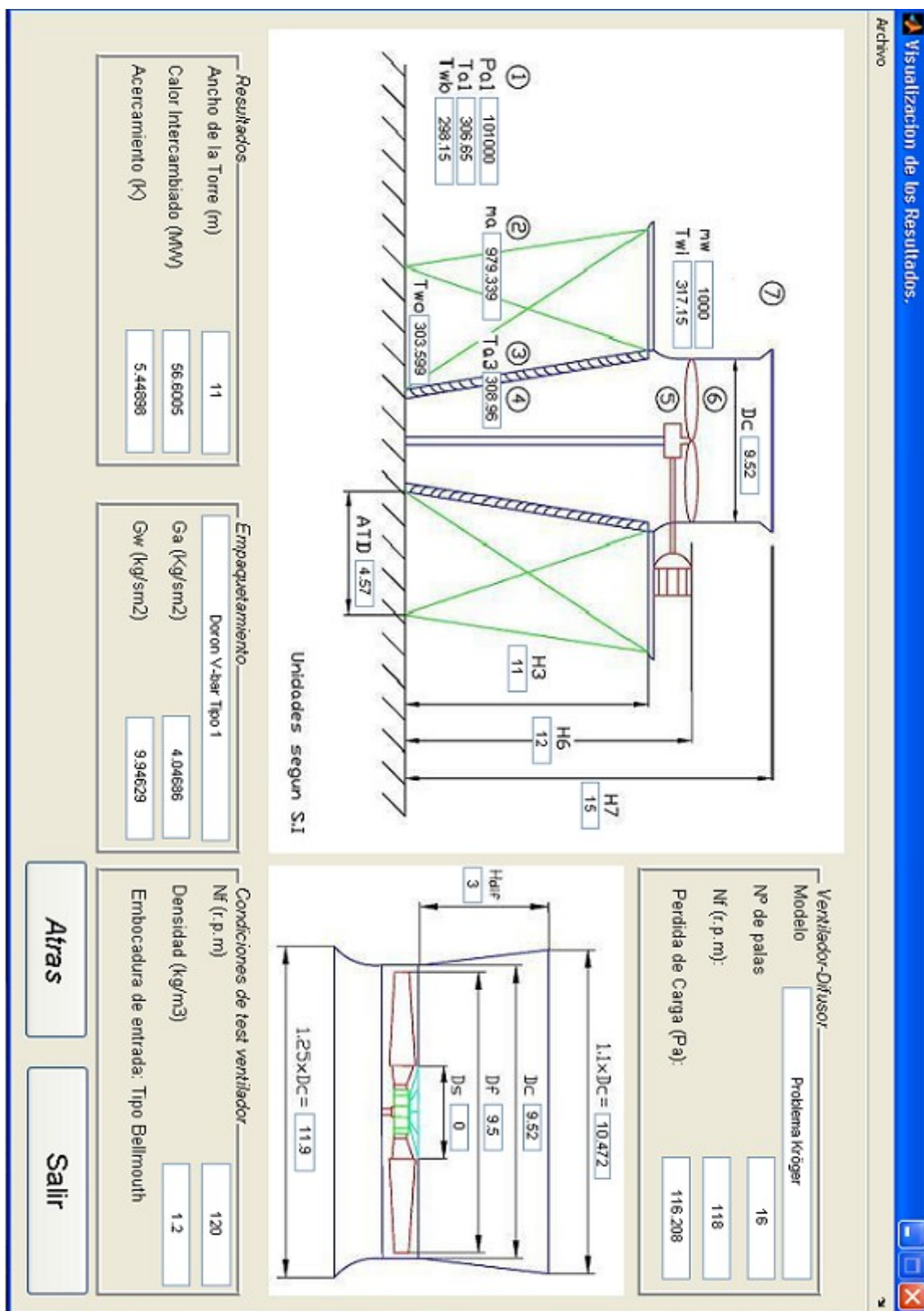


Fig.5.41.Resultados.



Llegados a este punto tenemos varias posibilidades:

- Guardar los resultados
- Imprimirlos
- Salir de la aplicación
- Volver atrás

Elegimos esta última opción y seleccionamos ahora otro tipo de empaquetamiento. Seleccionaremos Ecodyne T-bar tipo 1, quedando así la introducción de datos:

Fig.5.42.Ecodyne T-bar tipo 1 seleccionado.

Ahora volveremos a hacer uso del botón *Calcular*.



Y obtendremos los siguientes resultados:

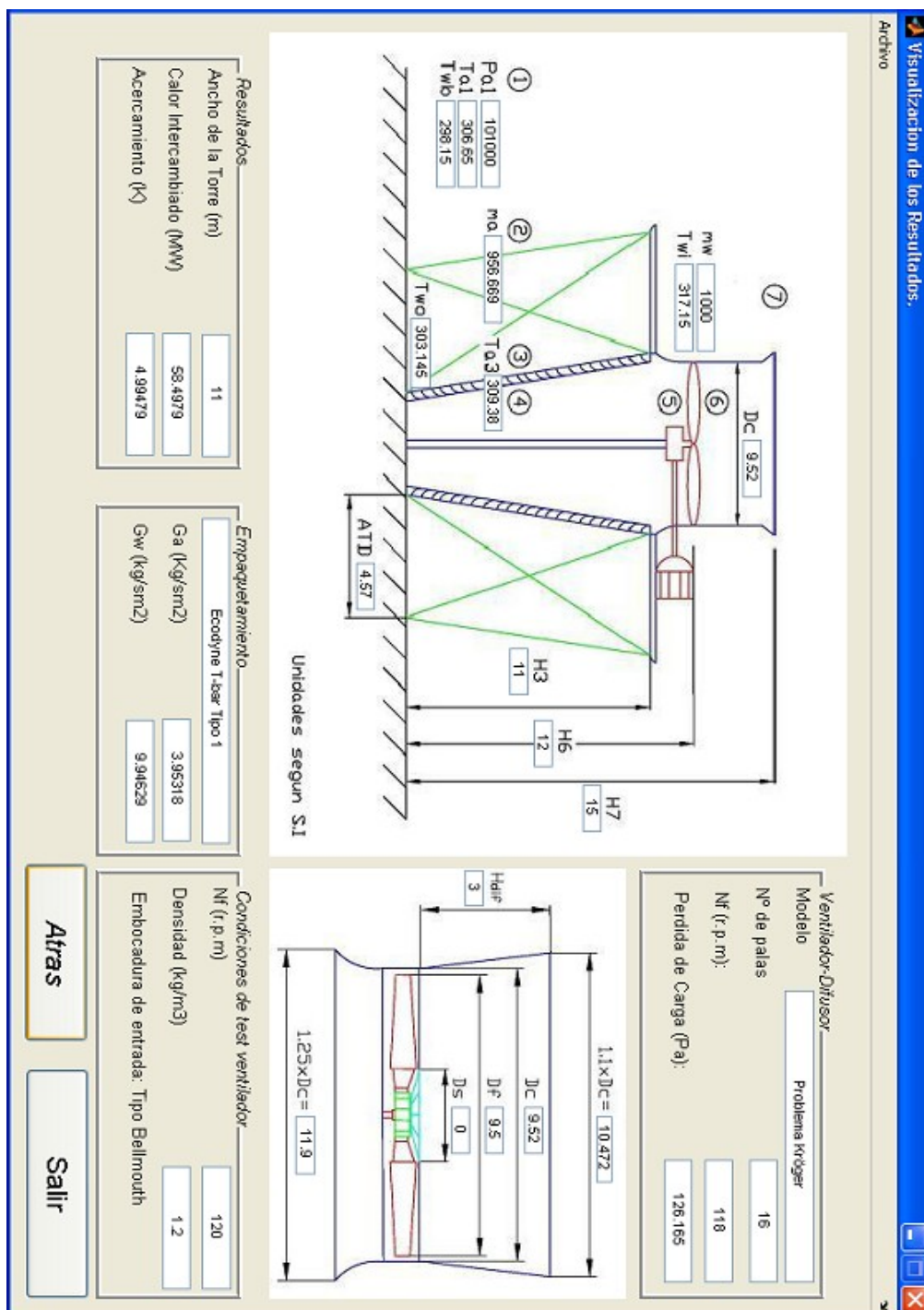


Fig.5.43.Resultados para Ecodyne T-bar tipo 1

El cambio de empaquetamiento del Doron V-bar tipo 1 al Ecodyne T-bar 1 trae consigo un aumento en la transferencia de calor.



Capítulo 6. Código de programación



6.1. Introducción

En este capítulo se pretende mostrar la parte del código de programación para la aplicación informática cuya parte gráfica se ha mostrado en el capítulo anterior.

Se mostrarán cada una de las partes que componen este código, siguiendo el diagrama de flujo y haciendo los comentarios oportunos del porque de su uso.

Para desarrollar este código se ha usado Matlab en su versión 7.4.0. Gracias al uso de los archivos de texto editables que componen el fichero *.m* correspondiente a cada archivo FIG o parte gráfica.

Existen partes del código que se generan automáticamente y que no son editables. Cuando alguna parte del código se ha explicado, no se volverá a hacer aunque esta se repita para alguna de las funciones.



6.2. Portada .m

A continuación se expone lo que constituye el código de inicio para la aplicación.

```
function varargout = portada(varargin)
% PORTADA M-file for portada.fig
%     PORTADA, by itself, creates a new PORTADA or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = PORTADA returns the handle to a new PORTADA or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     PORTADA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in PORTADA.M with the given input arguments.
%
%     PORTADA('Property','Value',...) creates a new PORTADA or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before portada_OpeningFunction gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to portada_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.

% Edit the above text to modify the response to help portada

% Last Modified by GUIDE v2.5 25-May-2006 16:59:06

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @portada_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @portada_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```



Hasta aquí son todas las líneas que incluye Matlab en la creación de un archivo M asociado a un archivo FIG, por lo que en lo siguiente no se repetirán.

```
% --- Executes just before portada is made visible.
function portada_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = portada_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

handles.fototorre=imread('fotoportada.jpg');
image(handles.fototorre, 'Parent', handles.axes1);
set(handles.axes1, 'Visible', 'off');

handles.escudo=imread('escudouc3m.jpg');
image(handles.escudo, 'Parent', handles.axes2);
set(handles.axes2, 'Visible', 'off');
```

Las líneas anteriores hacen que se inserten las imágenes en la primera ventana.

```
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

cont=0;
save cont cont -ascii
TorreHumedaGui
close(portada)
```

Arriba vemos como se gobierna el hecho de presionar el botón *Continuar*, que es el *pushbutton2*, lo que nos lleva a la apertura de la siguiente GUI que es TorreHumedaGui.

La variable *cont* se usa para el control de la introducción de datos y será mejor explicada mas adelante.



6.3. TorreHumedaGui.m

Se muestra a continuación el código que configura la ventana para introducción de datos.

```
% --- Executes just before TorreHumedaGui is made visible.
function TorreHumedaGui_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = TorreHumedaGui_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

handles.Dibujo1=imread('DatosPartida.jpg');
image(handles.Dibujo1,'Parent',handles.axes7);
set(handles.axes7,'Visible','off');
```

El código anterior regula la aparición de la imagen en la ventana de introducción de datos.

```
load cont
if cont==1;
    load('DatosIni','mw','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7','Nf',
'val1','val2','n1','n2')
    set(handles.edit1,'String',mw);
    set(handles.edit2,'String',Twi);
    set(handles.edit3,'String',Twb);
    set(handles.edit4,'String',Ta1);
    set(handles.edit5,'String',Pa1);
    set(handles.edit6,'String',H3);
    set(handles.edit7,'String',W3);
    set(handles.edit8,'String',ATD);
    set(handles.edit9,'String',H6);
    set(handles.edit10,'String',H7);
    set(handles.edit13,'String',Nf);
    set(handles.popupmenu2,'Value',val1);
    handles.fill=n1;
    image(handles.fill,'Parent',handles.axes8);
    set(handles.axes8,'Visible','off');
    set(handles.popupmenu3,'Value',val2);
    handles.fan=n2;
    image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
    set(handles.axes9,'Visible','off');
elseif cont==0;
    handles.fill=imread('filla.jpg');
    image(handles.fill,'Parent',handles.axes8);
    set(handles.axes8,'Visible','off');
    handles.fan=imread('12Fan.bmp');
    image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
    set(handles.axes9,'Visible','off');
end
```



La variable *cont* es cargada desde la ventana de resultados que se explicará después, de tal forma que si se ha pulsado *atrás* los valores introducidos permitan ser cargados y no se pierdan.

```
%edit1_Callback
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
else
    set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'));
end
%edit1_Callback
```

Con el código anterior se puede cambiar el color del fondo para los cuadros de texto editables. Por defecto es blanco y será el utilizado en esta aplicación. Se repiten para cada cuadro de texto editable y en lo sucesivo no se volverán a mencionar.

```
% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
val1 = get(hObject, 'Value');
switch val1
    case 1
        handles.fill=imread('filla.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 2
        handles.fill=imread('fillb.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 3
        handles.fill=imread('fillc.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 4
        handles.fill=imread('filld.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 5
        handles.fill=imread('fillh.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 6
        handles.fill=imread('fillf.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
    case 7
        handles.fill=imread('fillg.jpg');
        image(handles.fill, 'Parent', handles.axes8);
        set(handles.axes8, 'Visible', 'off');
end
```



El código anterior sirve para elegir uno de los 7 tipos de empaquetamiento y mostrar las imágenes correspondientes.

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
```

Este código sirve para cambiar el color del fondo del menú desplegable, que es por defecto blanco y no se cambiará.

```
% --- Executes on selection change in popupmenu3.
function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)

val2 = get(hObject,'Value');
switch val2
    case 1
        handles.fan=imread('40Fan.bmp');
        image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
        set(handles.axes9,'Visible','off');
    case 2
        handles.fan=imread('36Fan.bmp');
        image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
        set(handles.axes9,'Visible','off');
    case 3
        handles.fan=imread('20Fan.bmp');
        image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
        set(handles.axes9,'Visible','off');
    case 4
        handles.fan=imread('12Fan.bmp');
        image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
        set(handles.axes9,'Visible','off');
    case 5
        handles.fan=imread('ProblemaKroger.bmp');
        image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
        set(handles.axes9,'Visible','off');
end
```

Esta parte del código sirve para elegir entre cada uno de los 5 tipos de ventiladores y muestra la imagen correspondiente a cada tipo.



```
function Archivo_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function Abrir_Callback(hObject, eventdata, handles)

[fichero,camino]=uigetfile('*.mat','Abrir Valores Iniciales');

if isequal([fichero,camino],[0,0])
    return
end

fichero;

load(fichero,'mw','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7','Nf','val1',
'val2','n1','n2')
set(handles.edit1,'String',mw);
set(handles.edit2,'String',Twi);
set(handles.edit3,'String',Twb);
set(handles.edit4,'String',Ta1);
set(handles.edit5,'String',Pa1);
set(handles.edit6,'String',H3);
set(handles.edit7,'String',W3);
set(handles.edit8,'String',ATD);
set(handles.edit9,'String',H6);
set(handles.edit10,'String',H7);
set(handles.edit13,'String',Nf);
set(handles.popupmenu2,'Value',val1);
handles.fill=n1;
image(handles.fill,'Parent',handles.axes8);
set(handles.axes8,'Visible','off');
set(handles.popupmenu3,'Value',val2);
handles.fan=n2;
image(handles.fan,'Parent',handles.axes9);
set(handles.axes9,'Visible','off');
```

Arriba vemos el código de programación que gobierna el uso del menú *Archivo*. Encontramos la función *Abrir* que nos permite acceder a un archivo de extensión *.mat, abrirlo y cargar los valores en la ventana de introducción de datos.



```
function Guardarcomo_Callback(hObject, eventdata, handles)

mw=str2double(get(handles.edit1,'string'));
Twi=str2double(get(handles.edit2,'string'));
Twb=str2double(get(handles.edit3,'string'));
Tal=str2double(get(handles.edit4,'string'));
Pal=str2double(get(handles.edit5,'string'));
H3=str2double(get(handles.edit6,'string'));
W3=str2double(get(handles.edit7,'string'));
ATD=str2double(get(handles.edit8,'string'));
H6=str2double(get(handles.edit9,'string'));
H7=str2double(get(handles.edit10,'string'));
Nf=str2double(get(handles.edit13,'string'));
val1 = get(handles.popupmenu2,'Value');
switch val1
    case 1
        n1=imread('filla.jpg');
    case 2
        n1=imread('fillb.jpg');
    case 3
        n1=imread('fillc.jpg');
    case 4
        n1=imread('filld.jpg');
    case 5
        n1=imread('fillh.jpg');
    case 6
        n1=imread('fillf.jpg');
    case 7
        n1=imread('fillg.jpg');
end
val2 = get(handles.popupmenu3,'Value');
switch val2
    case 1
        n2=imread('40Fan.bmp');
    case 2
        n2=imread('34Fan.bmp');
    case 3
        n2=imread('20Fan.bmp');
    case 4
        n2=imread('12Fan.bmp');
    case 5
        n2=imread('ProblemaKroger.bmp');
end

[fichero,camino]=uiputfile('*.mat','Guardar Valores Iniciales');

if isequal([fichero,camino],[0,0])
    return
end

fichero;
```



```
save(fichero,'mw','Twi','Twb','Tal','Pal','H3','W3','ATD','H6','H7','Nf','val1',  
'val2','n1','n2')
```

En las líneas anteriores se guarda un resultado previamente introducido en la ventana de introducción de datos.

```
function Salir_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(TorreHumedaGui)  
clear all  
delete ('cont')  
delete ('DatosIni.mat')
```

En las líneas anteriores se ejecuta la función que sirve para salir del programa, y se cierra la venta de introducción de datos.

```
function Ayuda_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% -----  
function AyudaEmpaq_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject      handle to AyudaEmpaq (see GCBO)  
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)  
AyudaEmpaq  
% -----  
function AyudaVentilador_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject      handle to AyudaVentilador (see GCBO)  
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)  
AyudaVentilador
```

Arriba se muestra como el menú *Ayuda* contiene a su vez 2 submenús *Ventilador* y *Empaq*, que llaman a dos funciones que sirven de ayuda para las características de ventiladores y empaquetamientos.

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
mw=str2double(get(handles.edit1,'string'));  
Twi=str2double(get(handles.edit2,'string'));  
Twb=str2double(get(handles.edit3,'string'));  
Tal=str2double(get(handles.edit4,'string'));  
Pal=str2double(get(handles.edit5,'string'));  
H3=str2double(get(handles.edit6,'string'));  
W3=str2double(get(handles.edit7,'string'));  
ATD=str2double(get(handles.edit8,'string'));  
H6=str2double(get(handles.edit9,'string'));  
H7=str2double(get(handles.edit10,'string'));  
Nf=str2double(get(handles.edit13,'string'));  
val1 = get(handles.popupmenu2,'Value');  
val2 = get(handles.popupmenu3,'Value');
```



En las líneas anteriores asignamos los valores iniciales introducidos en la ventana de introducción o cargados de un fichero a las correspondientes variables.

```
switch val1
case 1%Doron V-bar 101.6x203.2
    ad=0.268;
    bd=0.56;
    ap=0.751;
    bpa=0.66;
    bpb=-0.73;
    n1=imread('filla.jpg');
case 2%Doron V-bar 203.2x203.2
    ad=0.239;
    bd=0.38;
    ap=0.985;
    bpa=0.72;
    bpb=-0.82;
    n1=imread('fillb.jpg');
case 3%Ecodyne T-bar 101.6x203.2
    ad=0.263;
    bd=0.34;
    ap=0.112;
    bpa=1.30;
    bpb=-0.22;
    n1=imread('fillc.jpg');
case 4%Ecodyne T-bar 203.2x203.2
    ad=0.245;
    bd=0.35;
    ap=0.206;
    bpa=0.89;
    bpb=-0.069;
    n1=imread('filld.jpg');
case 5%Wood lath 101.6x101.6 parallel
    ad=0.274;
    bd=0.45;
    ap=1.437;
    bpa=0.76;
    bpb=-0.80;
    n1=imread('fillh.jpg');
case 6%Wood lath 101.6x101.6 perpendicular
    ad=0.358;
    bd=0.57;
    ap=1.828;
    bpa=0.71;
    bpb=-0.59;
    n1=imread('fillf.jpg');
case 7%Marley alpha bar
    ad=0.307;
    bd=0.052;
    ap=1.816;
    bpa=0.71;
    bpb=-0.85;
    n1=imread('fillg.jpg');
end
```



Con el código *switch* usado mas arriba se consigue asignar valores a los parámetros característicos de los empaquetamientos dependiendo del tipo elegido.

```
switch val2
case 1
    A1=-0.00044885;
    B1=0.886987702;
    C=186.6217267;
    D1=0;
    Df=12.19;
    Dc=12.31;
    Ds=4.06;
    Nft=110;
    np=20;
    rot=1.1986;%densidad mezcla aire-vapor en test
    n2=imread('40Fan.bmp');

case 2
    A1=0.000243415;
    B1=-1.16746807;
    C=1378.64075;
    D1=0;
    Df=10.97;
    Dc=11.08;
    Ds=4.06;
    Nft=110;
    np=16;
    rot=1.1986;
    n2=imread('36Fan.bmp');

case 3
    A1=-0.001165981;
    B1=0.377297668;
    C=25.77846365;
    D1=0;
    Df=6.09;
    Dc=6.15;
    Ds=1.62;
    Nft=110;
    np=4;
    rot=1.1986;
    n2=imread('20Fan.bmp');

case 4
    A1=-0.0303207;
    B1=1.418658892;
    C=41.15976676;
    D1=0;
    Df=3.65;
    Dc=3.69;
    Ds=0.96;
    Nft=110;
    np=8;
    rot=1.1986;
    n2=imread('12Fan.bmp');
```



```
case 5
    rot=1.2;%densidad mezcla aire-vapor en test
    A1=(-96.5087e-6/rot^2);
    B1=(40.0071e-3/rot);
    C=299.903;
    D1=(-152.2243e-9/rot^3);
    Df=9.50;
    Dc=9.52;
    Ds=0;
    Nft=120;
    np=8;
    n2=imread('ProblemaKroger.bmp');
end
```

De igual manera se asignan valores a las variables utilizadas para el cálculo de los ventiladores, donde A, B, C y D son variables usadas para descripción de la curva característica del ventilador.

```
q1 = isnan(mw);
q2 = isnan(Twi);
q3 = isnan(Twb);
q4 = isnan(Tal);
q5 = isnan(Pal);
q6 = isnan(H3);
q7 = isnan(W3);
q8 = isnan(ATD);
q9 = isnan(H6);
q10 = isnan(H7);
q11 = isnan(Nf);

if ( q1 == 1 || q2 == 1 || q3 == 1 || q4 == 1 || q5 == 1 || q6 == 1 || q7 == 1
|| q8 == 1 || q9 == 1 || q10 == 1 || q11 == 1 )
    errordlg('Asegurese de que todos los campos introducidos esten en las
unidades correctas y tengan valor numerico', 'Aviso')
end;

if ( q1 == 0 && q2 == 0 && q3 == 0 && q4 == 0 && q5 == 0 && q6 == 0 && q7 == 0
&& q8 == 0 && q9 == 0 && q10 == 0 && q11 == 0 )
```

Se comprueba si los datos introducidos son correctos.



```

for j=1:25
    Te(j)=Tb(j);
    Ta3=Te(j);

    save('DatosIni','mw','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7',
        'Nf','Kud','val1','val2','ad','bd','ap','bpa','bpb','A1','B1',
        'C','D1','Df','Dc','Ds','rot','Nft','n1','n2','Two','Ta3','np')

    if j==1
        ma=mw;
        TorreHum;
        load('DatosResul','ma','Two','Pa3','Ta3','imas3','ima3','Q',
            'app','Ga','Gw','PerdCargVent')
        load('Datoserr','err')
    else
        TorreHum;
        load('DatosResul','ma','Two','Pa3','Ta3','imas3','ima3','Q',
            'app','Ga','Gw','PerdCargVent')
        load('Datoserr','err')
    end

    if ima3>=imas3

        if j>1
            Ta3=(Te(j)+Te(j-1))/2;
        end

        break

    end

end
end

```

En el bucle anterior se realizan las iteraciones necesarias para llegar al resultado requerido, llamando para ello al archivo TorreHum.m, donde se realiza el cálculo. También se cargan los datos de error, para saber si se ha conseguido hallar la solución para el problema.

```

save('DatosIni','mw','ma','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6',
    'H7','Nf','Df','Dc','Ds','val1','val2','ad','bd','ap','bpa','bpb',
    'A1','B1','C','D1','rot','Nft','n1','n2','Two','Ta3','np')

save('DatosResul','ma','Two','Pa3','Ta3','imas3','ima3','Q','app','Ga',
    'Gw','PerdCargVent')

save('Datoserr','err')
close(TorreHumedaGui)
ResultadosGui
end

```

Con las líneas anteriores se guarda todo lo calculado, se cierra TorreHumedaGui y se llama a la ventana de resultados para mostrarlos.



6.4. AyudaVentilador.m

Código de la ventana de ayuda para las dimensiones y características de ventiladores y difusores

```
function AyudaVentilador_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for AyudaVentilador
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = AyudaVentilador_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

handles.AyudaVentilador=imread('ayudaventilador1.jpg');
image(handles.AyudaVentilador,'Parent',handles.axes2);
set(handles.axes2,'Visible','off');

handles.AyudaVentilador=imread('ayudaventilador2.jpg');
image(handles.AyudaVentilador,'Parent',handles.axes4);
set(handles.axes4,'Visible','off');

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

close(AyudaVentilador)
TorreHumedaGui
```




6.5 AyudaEmpaq.m

Se muestra aquí el código que rige el comportamiento de la ayuda a las características de los empaquetamientos utilizados.

```
function AyudaEmpaq_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for AyudaEmpaq
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = AyudaEmpaq_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

handles.AyudaEmpaq=imread('ayudaempaq.jpg');
image(handles.AyudaEmpaq,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off');

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

close(AyudaEmpaq)
TorreHumedaGui
```



6.6. TorreHum.m

En este archivo se desarrolla el método de cálculo de efectividad-NTU explicado anteriormente.

```
function TorreHum

load
('DatosIni','mw','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7','Nf','Kud',
'val1','val2','ad','bd','ap','bpa','bpb','A1','B1','C','D1','Dc','Ds','rot',
'Nft','n1','n2','Two','Ta3','np')

%Valores fijos:
%-----
Afra=2*H3*W3;
Afrw=2*W3*ATD;
Gw=mw/Afrw;
%-----%calcula condiciones en 1
T=Ta1;
Pabs=Pa1;
CorreVaporAireAgua;
w1=w;
roav1=roav;
nuav1=nuav;
Cpa1=Cpa;
Cpv1=Cpv;
ima1=ima;
```

Después de cargar los datos iniciales, se calculan los valores fijos y se llama a CorreVaporAireAgua para el cálculo de las condiciones en el punto 1.

```
%-----%calcula condiciones en 3
T=Ta3;
Twb=Ta3;
Pa3=Pa1;
Pabs=Pa3;
CorreVaporAireAgua;
w3=w;
roav3=roav;
nuav3=nuav;
Cpa3=Cpa;
Cpv3=Cpv;
ima3=ima;
%-----%calcula condiciones de 1 a 3
roav13=2*(1/(1/roav1+1/roav3));
save ('Datosma','w1','w3','roav13','roav1','roav3')
```

De igual manera se calculan las condiciones en 3 y las condiciones de 1 a 3.



```
load('Datosmasa','ma')
FlujoMasico
load('Datosmasa','ma')
load('DatosResul','PerdCargVent')
load('Datoserr','err')
Ga=ma/Afra;
```

En las líneas anteriores se carga el valor del flujo másico de aire y se llama a FlujoMasico, que calculará el valor del flujo másico de aire.

```
%-----obtener imaswi a Twi
T=Twi;
Twb=Twi;
Pabs=Pal;
CorreVaporAireAgua;
imaswi=ima;

%-----obtener imaswo a Two
T=Two;
Twb=Two;
Pabs=Pal;
CorreVaporAireAgua;
imaswo=ima;

%-----obtener imaswm a Twm
Twm=(Twi+Two)/2;
T=Twm;
Twb=Twm;
Pabs=Pal;
CorreVaporAireAgua;
imaswm=ima;
load('DatosIni','Twb')

%-----obtener GRADIENTE
GRADIENTE=(imaswi-imaswo)/(Twi-Two);

%-----
Twm=(Twi+Two)/2;
T=Twm;
CorreAgua;
Cpwm=Cpw;
Cel=(mw*Cpwm)/GRADIENTE;
Ce2=ma;
if Cel<Ce2
    Ce=Cel/Ce2;
    lambda=(imaswo+imaswi-2*imaswm)/4;
    Qmax=Cel*(imaswi-lambda-imal);
    NTUe=ad*(Gw/Ga)^(-bd)*(mw*H3/Cel);
    e=1-exp(NTUe^0.22*(exp(-Ce*NTUe^0.78)-1)/Ce);
    Q=e*Qmax;
elseif Cel>Ce2
    Ce=Ce2/Cel;
    lambda=(imaswo+imaswi-2*imaswm)/4;
    Qmax=Ce2*(imaswi-lambda-imal);
    NTUe=ad*(Gw/Ga)^(-bd)*(mw*H3/Ce2);
    e=1-exp(NTUe^0.22*(exp(-Ce*NTUe^0.78)-1)/Ce);
    Q=e*Qmax;
end
```



En las líneas anteriores se desarrolla el método de eficiencia-NTU.

```
Two=Two-Twi-Q/(mw*Cpwm);  
imas3=(mw/ma)*Cpwm*(Two-Twi)+ima1;  
app=Two-Twb;  
save ('DatosResul','ma','Two','Pa3','Ta3','imas3','ima3','Q','app','Ga','Gw',  
      'PerdCargVent')  
  
save ('Datoserr','err')
```

En las líneas de código anteriores se calcula el valor de la temperatura de salida del agua, así como la entalpía del aire saturado a la salida del empaquetamiento.



6.7. FlujoMasico.m

```
function FlujoMasico
load('DatosIni','mw','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7',
     'Nf','val1','val2','ad','bd','ap','bpa','bpb','A1','B1','C','D1',
     'Dc','Ds','rot','Nft','n1','n2','Two','Ta3')
load('Datosma','w1','w3','roav13','roav1','roav3')

%Valores fijos:
%-----
Afra=2*H3*W3;
Afrw=2*W3*ATD;
Gw=mw/Afrw;
```

En las líneas anteriores se cargan los datos iniciales y se calculan algunos valores fijos.

```
for i=1:40
load('Datosmasa','ma')
mav1=ma*(1+w1);
mav13=ma*(2+w1+w3)/2;
K1=((1+w3)/roav3)*(Nft/Nf);
K2=((2+w1+w3)/2)/(roav13*Afra);
K3=(4*(1+w3))/(roav3*pi*(Dc^2));
K4=27.4892*((1+w3)/(nuav3*Afra))^-0.14247;
K5=(roav13/roav3)*((2*(1+w3))/(2+w1+w3))^2;
Kud=0.5;
if val2~=5
    Kfsfi=0.5*(roav13/roav1)*((mav1/mav13))^2;
    Kdif=0.062;
    N2=Kfsfi;
    Cs=K4*K5*(roav13/2)*(K2^2);
else
    Kdif=0;
    Kde=3;
    Kdefi=Kde*(roav13/roav3)*((2*(1+w3))/(2+w1+w3))^2;
    Kfsfi=0.5;
    N2=(Kfsfi+Kdefi);
    Cs=0;
end
F=((Nf/Nft)^2)*(roav3/rot);
N1=((((1+w3)^2)/(roav3*Afra^2))-(((1+w1)^2)/(roav1*Afra^2)))/(roav13*K2^2);
N3=((ap*Gw^bpa)/(Afra^bpb))*ATD;
As=(N2*((roav13/2)*K2^2)+(N1*(roav13/2)*K2^2)+((Kud-Kdif)*(roav3/2)*K3^2));
Bs=(N3*(roav13/2)*K2^2);
Av=F*A1*(rot^2)*(K1^2);
Bv=F*B1*rot*K1;
Cv=F*C;
Dv=F*D1*(rot^3)*(K1^3);
PerdidaCargaVentilador(i)=Dv*ma^3+Av*ma^2+Bv*ma+Cv;
PerdidaCargaSistema(i)=As*ma^2+Bs*(ma^(2+bpb))+Cs*(ma^1.85753);
deltaP(i)=Dv*ma^3+(Av-As)*ma^2-Bs*(ma^(2+bpb))+Bv*ma-Cs*(ma^1.85753)+Cv;
DdeltaP(i)=3*Dv*ma^2+2*(Av-As)*ma-Bs*(2+bpb)*ma^(1+bpb)+Bv-
1.85753*Cs*(ma^0.85753);
```



```

ma=abs(ma-(deltaP(i)/DdeltaP(i)));
PerdCargVent=PerdidaCargaVentilador(i);
save('Datosmasa','ma')
if deltaP(i)==0
    err=0;
    save('Datoserr','err')
    save('Datosmasa','ma')
    save('DatosResul','PerdCargVent')
    break
end
end

if deltaP(i)<0 || deltaP(i)>0
    err=1;
end
save('Datoserr','err')
save('Datosmasa','ma')
save('DatosResul','PerdCargVent')

```

En las líneas anteriores está implementado el código para el cálculo del flujo másico de aire que atraviesa la torre, mediante un bucle de 40 iteraciones. Extraemos a continuación las partes principales para explicar su funcionamiento.

```

if val2~=5
    Kfsfi=0.5*(roav13/roav1)*((mav1/mav13)^2;
    Kdif=0.062;
    N2=Kfsfi;
    Cs=K4*K5*(roav13/2)*(K2^2);
else
    Kdif=0;
    Kde=3;
    Kdefi=Kde*(roav13/roav3)*((2*(1+w3))/(2+w1+w3))^2;
    Kfsfi=0.5;
    N2=(Kfsfi+Kdefi);
    Cs=0;
end

```

La condición anterior sirve para diferenciar entre el problema del libro, donde se ensaya el ventilador junto con el difusor, de nuestro análisis por separado.

La siguiente parte del código anterior:

```

if deltaP(i)==0
    err=0;
    save('Datoserr','err')
    save('Datosmasa','ma')
    save('DatosResul','PerdCargVent')
    break

```

Permite salir del bucle si se cumple la condición de que la diferencia entre la pérdida de carga entre el ventilador y el sistema es nula. La variable *err* nos servirá para controlar si existe o no solución para el problema.



```
if deltaP(i)<0 || deltaP(i)>0
    err=1;
end
save('Datoserr','err')
save('Datosmasa','ma')
save('DatosResul','PerdCargVent')
```

En el código anterior se comprueba si se ha llegado a una solución, y si no hay solución la variable *err* valdrá 1.



6.8.CorreVaporAireAgua.m

En este archivo se encuentran las correlaciones para el cálculo de las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua.

%Correlaciones para la mezcla de aire y vapor de agua.

```
zvw=10.79586*(1-(273.16/Twb))+5.02808*log10(273.16/Twb)+1.50474e-4*(1-10^(-
8.29692*((Twb/273.16)-1)))+4.2873e-4*(10^(4.76955*(1-(273.16/Twb))-
1))+2.786118312;
Pvwb=10^zvw;
```

La relación de humedades será:

```
w=((2501.6-2.3263*(Twb-273.15))/(2501.6+1.8577*(T-273.15)-4.184*(Twb-
273.15)))*(0.62509*Pvwb)/(Pabs-(1.005*Pvwb))-((1.00416*(T-Twb))/(
2501.6+1.8577*(T-273.15)-4.184*(Twb-273.15)));
```

La densidad:

```
rhoav=((1+w)*(1-(w/(w+0.62198)))*Pabs)/(287.08*T);
```

Los valores específicos se calculan mediante:

```
Tr=(T+273.15)/2;
Cpa=1.045356e3-3.161783e-1*Tr+7.083814e-4*Tr^2-2.705209e-7*Tr^3;
Cpv=1.3605e3+2.31334*Tr-2.46784e-10*Tr^5+5.91332e-13*Tr^6;
Cpav=(Cpa+(w*Cpv))/(1+w);
Cpma=Cpa+(w*Cpv);
```

La entalpia:

```
ifgwo=2.5016e6;
iav=(Cpa*(T-273.15)+(w*(ifgwo+(Cpv*(T-273.15))))) / (1+w);
ima=Cpa*(T-273.15)+(w*(ifgwo+(Cpv*(T-273.15))));
```

Viscosidad dinámica de la mezcla:

```
Ma=28.97;
Mv=18.016;
Xa=1/(1+(1.608*w));
Xv=w/(w+0.622);
nua=2.287973e-6+6.259793e-8*T-3.131956e-11*T^2+8.15038e-15*T^3;
nuv=2.562435e-6+1.816683e-8*T+2.579066e-11*T^2-1.067299e-14*T^3;
nuav=(Xa*nua*Ma^0.5+Xv*nuv*Mv^0.5)/(Xa*Ma^0.5+Xv*Mv^0.5);
```




6.9. CorreAgua.m:

En este archivo encontramos las correlaciones para las propiedades del agua.

Densidad:

$$\rho_w = (1.49343e-3 - 3.7164e-6 * T + 7.09782e-9 * T^2 - 1.90321e-20 * T^6)^{-1};$$

Presión:

$$P_v = 10^{(10.79586 * (1 - 273.16/T) + 5.02808 * \log(273.16/T) + 1.50474 * 0.0001 * (1 - 10^{(-8.29692 * (T/273.16) - 1)}) + 4.2873 * 0.0001 * (10^{(4.76955 * (1 - 273.16/T)) - 1}) + 2.786118312)};$$

Calores específicos:

$$C_{pv} = 1.3605e3 + 2.31334 * T - 2.46784e-10 * T^5 + 5.91332e-13 * T^6;$$

$$C_{pw} = 8.15599e3 - 2.80627 * 10 * T + 5.11283e-2 * T^2 - 2.17582e-13 * T^6;$$



6.10. ResultadosGui.m:

Aquí se guarda el código para la ventana de visualización de datos:

```
function ResltadosGui_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = ResultadosGui_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

handles.resultado=imread('DatosResultado.jpg');
image(handles.resultado,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off');

handles.ventilador=imread('VentiladorDifusor.jpg');
image(handles.ventilador,'Parent',handles.axes3);
set(handles.axes3,'Visible','off');
```

En las líneas anteriores se cargan las imágenes que forman parte de la parte gráfica de la ventana.

```
load('DatosIni','mw','ma','Twi','Twb','Ta1','Pa1','H3','W3','ATD','H6','H7',
     'Nf','val1','val2','ad','bd','ap','bpa','bpb','A1','B1',
     'C','D1','Df','Dc','Ds','rot','Nft','n1','n2','Two','Ta3',
     'np')

load('DatosResul','ma','Two','Pa3','Ta3','imas3','ima3','Q','app','Ga','Gw',
     'PerdCargVent')

load('Datoserr','err')
if err==1
    errordlg('Las gráficas no se cortan, por lo que el problema no tiene
solución','Aviso')
    mw=0;
    Twi=0;
    Pa1=0;
    Ta1=0;
    Twb=0;
    H3=0;
    W3=0;
    ATD=0;
    H6=0;
    H7=0;
    Nf=0;
    Dc=0;
    Ta3=0;
    Two=0;
    ma=0;
    app=0;
    Q=0;
```



```
Ga=0;  
Gw=0;  
np=0;  
PerdCargVent=0;  
Nft=0;  
rot=0;  
Df=0;  
Dc=0;  
Ds=0;  
end
```

En las líneas anteriores se cargan los datos necesarios y se comprueba si la variable *err* es 1, y si es así se muestra un mensaje de error.

```
set(handles.edit46,'String',mw);  
set(handles.edit50,'String',Twi);  
set(handles.edit7,'String',Pa1);  
set(handles.edit8,'String',Ta1);  
set(handles.edit32,'String',Twb);  
set(handles.edit38,'String',H3);  
set(handles.edit68,'String',W3);  
set(handles.edit42,'String',ATD);  
set(handles.edit44,'String',H6);  
set(handles.edit39,'String',H7);  
set(handles.edit58,'String',Nf);  
set(handles.edit51,'String',Dc);  
set(handles.edit33,'String',Ta3);  
set(handles.edit37,'String',Two);  
set(handles.edit30,'String',ma);  
set(handles.edit67,'String',app);  
set(handles.edit2,'String',Q/1000000);  
set(handles.edit69,'String',Ga);  
set(handles.edit70,'String',Gw);  
set(handles.edit21,'String',np);  
set(handles.edit65,'String',PerdCargVent);  
set(handles.edit62,'String',Nft);  
set(handles.edit63,'String',rot);  
set(handles.edit54,'String',Df);  
set(handles.edit52,'String',Dc);  
set(handles.edit56,'String',Ds);  
set(handles.edit53,'String',1.1*Dc);  
set(handles.edit57,'String',1.25*Dc);  
set(handles.edit55,'String',H7-H6);
```

En las líneas anteriores asignamos a cada cuadro de texto el resultado correspondiente.



```
if (val1 == 1)
    set(handles.edit28, 'String', 'Doron V-bar Tipo 1');
elseif (val1 == 2)
    set(handles.edit28, 'String', 'Doron V-bar Tipo 2');
elseif (val1 == 3)
    set(handles.edit28, 'String', 'Ecodyne T-bar Tipo 1');
elseif (val1 == 4)
    set(handles.edit28, 'String', 'Ecodyne T-bar Tipo 2');
elseif (val1 == 5)
    set(handles.edit28, 'String', 'Wood Lath Tipo 1');
elseif (val1 == 6)
    set(handles.edit28, 'String', 'Wood Lath Tipo 2');
elseif (val1 == 7)
    set(handles.edit28, 'String', 'Marley Alpha-bar');
end
```

Aquí fijamos el resultado correspondiente a cada tipo de empaquetamiento.

```
if (val2 == 1)
    set(handles.edit15, 'String', '40H-20');
elseif (val2 == 2)
    set(handles.edit15, 'String', '36H-16');
elseif (val2 == 3)
    set(handles.edit15, 'String', '20H-4');
elseif (val2 == 4)
    set(handles.edit15, 'String', '12H-8');
elseif (val2 == 5)
    set(handles.edit15, 'String', 'Problema Kröger');
end
```

Con el bucle anterior se establece una cadena de texto correspondiente al tipo de ventilador elegido.

```
switch val2
case 1
    mai=1140;
    mas=1960;
case 2
    mai=820;
    mas=1460;
case 3
    mai=175;
    mas=250;
case 4
    mai=25;
    mas=60;
case 5
    mai=200;
    mas=1210;
end
```



```
if ma<mai && err==0 || ma>mas && err==0
    errordlg('El ventilador se encuentra cerca de las condiciones de
agotamiento', 'Aviso')
end
```

En las líneas anteriores establecemos los límites de flujo másico para los ventiladores, mostrando un mensaje de error si son rebasados.

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)%boton salir

close(ResultadosGui)
clear all
delete ('cont')
delete ('DatosIni.mat')
delete ('Datosmasa.mat')
delete ('Datosma.mat')
delete ('Datoserr.mat')
delete ('DatosResul.mat')
```

Pulsando el boton *Salir*, se ejecuta lo anterior.

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)%boton atras

cont=1;
save cont cont -ascii
close (ResultadosGui)
close all
delete ('cont')
delete ('Datosmasa.mat')
delete ('Datosma.mat')
delete ('Datoserr.mat')
delete ('DatosResul.mat')
clear all
TorreHumedaGui
```

Pulsando el botón *Atrás*, se vuelve a llamar a la ventana de introducción de datos.

```
function GuardarResul_Callback(hObject, eventdata, handles)

mw=str2double(get(handles.edit46,'String'));
Twi=str2double(get(handles.edit50,'String'));
Pal=str2double(get(handles.edit7,'String'));
Tal=str2double(get(handles.edit8,'String'));
Twb=str2double(get(handles.edit32,'String'));
H3=str2double(get(handles.edit38,'String'));
W3=str2double(get(handles.edit68,'String'));
ATD=str2double(get(handles.edit42,'String'));
H6=str2double(get(handles.edit44,'String'));
H7=str2double(get(handles.edit39,'String'));
Nf=str2double(get(handles.edit58,'String'));
Dc=str2double(get(handles.edit51,'String'));
Ta3=str2double(get(handles.edit33,'String'));
```



```
Two=str2double(get(handles.edit37,'String'));
ma=str2double(get(handles.edit30,'String'));
app=str2double(get(handles.edit67,'String'));
Q=str2double(get(handles.edit2,'String'));
Ga=str2double(get(handles.edit69,'String'));
Gw=str2double(get(handles.edit70,'String'));
np=str2double(get(handles.edit21,'String'));
PerdCargVent=str2double(get(handles.edit65,'String'));
Nft=str2double(get(handles.edit62,'String'));
rot=str2double(get(handles.edit63,'String'));

Df=str2double(get(handles.edit54,'String'));
Ds=str2double(get(handles.edit56,'String'));
DiamSalidaDifusor=str2double(get(handles.edit53,'String'));
DiametroBocaEntrada=str2double(get(handles.edit57,'String'));
Hdif=str2double(get(handles.edit55,'String'));
[fichero,camino]=uiputfile('*.mat','Guardar Resultados');

if isequal([fichero,camino],[0,0])
    return
end

fichero;

save(fichero,'mw','Twi','Pa1','Ta1','Twb','H3','W3','ATD','H6','H7','Nf','Dc',
    'Ta3','Two','ma','app','Q','Ga','Gw','np','PerdCargVent','Nft','rot',
    'Df','Ds','DiamSalidaDifusor','DiametroBocaEntrada','Hdif')
```

En las líneas anteriores se guardan los resultados obtenidos.

```
function edit28_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit28_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% -----
function Imprimir_Callback(hObject, eventdata, handles)

printpreview(ResultadosGui)
```

El código de arriba sirve para imprimir los resultados.

```
function Archivo_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function Atras_Callback(hObject, eventdata, handles)

cont=1;
save cont cont -ascii
```



```
close(ResultadosGui)
delete ('DatosIni.mat')
delete ('Datosmasa.mat')
delete ('Datosma.mat')
delete ('Datoserr.mat')
delete ('DatosResul.mat')
clear all
TorreHumedaGui

% -----
function Salir_Callback(hObject, eventdata, handles)

close(ResultadosGui)
clear all
delete ('cont')
delete ('DatosIni.mat')
delete ('Datosmasa.mat')
delete ('Datosma.mat')
delete ('Datoserr.mat')
delete ('DatosResul.mat')
```

Con las líneas anteriores se gestiona el funcionamiento del menú *Archivo*.



Capítulo 7. Conclusiones.



Conclusiones

Al comienzo de este proyecto se fijó como objetivo el desarrollo de una aplicación informática para el cálculo y diseño de torres de refrigeración húmeda de tiro inducido y flujo cruzado. Se dijo también que esta aplicación se pretende sea englobada dentro de una serie de aplicaciones realizadas con Matlab, que permitirán el cálculo y diseño de una gama, lo mas amplia posible, de torres de refrigeracion.

Después de estudiar los diferentes tipos de torres se concluyó hacer el estudio para torres de tiro inducido, por ser amplio su uso en el ámbito comercial e industrial, entre las cuales se eligió la de flujo cruzado.

Más tarde se estudiaron las bases teóricas de este tipo de torres y se ideó un método que intenta ser mas detallado que el utilizado por el profesor Detlev G. Kröger en su libro antes mencionado.

Para el paso de este método a lenguaje informático se eligió Matlab por ser una herramienta potente y con una interfaz gráfica de sencillo manejo. La interfaz gráfica se desarrolló para ajustarla a las necesidades requeridas por el problema para ,de forma posterior, pasar el método al código de programación que sirve de base a aquella.

El resultado de todo lo anterior, es un mejor conocimiento de este tipo de torres así como la obtención de una herramienta informática de sencillo manejo, práctica y de eficacia probada.

Para probar esta aplicación informática de forma gratuita contactar con:

andresblan@hotmail.com



Bibliografía e Índices



Bibliografía

-Air Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers (Vols .1 y 2)

Kröger, Detlev G.

Editorial: PennWell Corporation.

-Fundamentos de transferencia de calor.

Incropera, Frank P.

David P. De Witt

Editorial: Pearson.

-Fundamentos de Termodinámica Técnica

M.J. Moran

H.N. Shapiro

Editorial: Reverté

-Cooling Towers.

Singham, J.R.

Editorial: Begell House Inc.

-Process Heat Transfer.

Hewitt, Geoffrey Frederick

Editorial: CRC Press.

-Métodos Numéricos con Matlab.

Mathews, John H.

Editorial: Prentice Hall.

-Matlab Guide.

Higham, D.J.

Editorial: Sigam.



Páginas Web.

-<http://www.hudsonproducts.com/>

Curvas en información de ventiladores axiales.

-<http://www.cti.org/>

Cooling Tower Institute

-<http://www.jacir.fr/>

Empaquetamientos y eliminadores de gotas para torres de refrigeración.

-<http://www.esindus.es/>

-<http://www.sulzercoolingtowers.com/>

**Índice de Figuras**Capítulo 2:

Fig.2.1.....	Pag.8
Fig.2.2.....	Pag.9
Fig.2.3.....	Pag.10
Fig.2.4.....	Pag.11
Fig.2.5.....	Pag.11
Fig.2.6.....	Pag.12
Fig.2.7.....	Pag.13

Capítulo 3:

Fig.3.1.....	Pag.18
Fig.3.2.....	Pag.20
Fig.3.3.....	Pag.31
Fig.3.4.....	Pag.32
Fig.3.5.....	Pag.32
Fig.3.6.....	Pag.33
Fig.3.7.....	Pag.34
Fig.3.8.....	Pag.37
Fig.3.9.....	Pag.38
Fig.3.10.....	Pag.38
Fig.3.11.....	Pag.40
Fig.3.12.....	Pag.40
Fig.3.13.....	Pag.41
Fig.3.14.....	Pag.42
Fig.3.15.....	Pag.33
Fig.3.16.....	Pag.45
Fig.3.17.....	Pag.46
Fig.3.18.....	Pag.47
Fig.3.19.....	Pag.47
Fig.3.20.....	Pag.48
Fig.3.21.....	Pag.48
Fig.3.22.....	Pag.49
Fig.3.23.....	Pag.50
Fig.3.24.....	Pag.52
Fig.3.25.....	Pag.53
Fig.3.26.....	Pag.54
Fig.3.27.....	Pag.54

Capítulo 4:

Fig.4.1.....	Pag.57
Fig.4.2.....	Pag.58
Fig.4.3.....	Pag.60
Fig.4.4.....	Pag.61
Fig.4.5.....	Pag.63
Fig.4.6.....	Pag.63
Fig.4.7.....	Pag.64
Fig.4.8.....	Pag.64
Fig.4.9.....	Pag.65
Fig.4.10.....	Pag.66
Fig.4.11.....	Pag.74
Fig.4.12.....	Pag.84

Capítulo 5:

Fig.5.1.....	Pag.87
Fig.5.2.....	Pag.88
Fig.5.3.....	Pag.89
Fig.5.4.....	Pag.89
Fig.5.5.....	Pag.90
Fig.5.6.....	Pag.91
Fig.5.7.....	Pag.92
Fig.5.8.....	Pag.93
Fig.5.9.....	Pag.94
Fig.5.10.....	Pag.95
Fig.5.11.....	Pag.97
Fig.5.12.....	Pag.98
Fig.5.13.....	Pag.99
Fig.5.14.....	Pag.100
Fig.5.15.....	Pag.100
Fig.5.16.....	Pag.101
Fig.5.17.....	Pag.102
Fig.5.18.....	Pag.102
Fig.5.19.....	Pag.103
Fig.5.20.....	Pag.104
Fig.5.21.....	Pag.104
Fig.5.22.....	Pag.104
Fig.5.23.....	Pag.105
Fig.5.24.....	Pag.105



Fig.5.25.....	Pag.106
Fig.5.26.....	Pag.106
Fig.5.27.....	Pag.107
Fig.5.28.....	Pag.107
Fig.5.29.....	Pag.108
Fig.5.30.....	Pag.109
Fig.5.31.....	Pag.109
Fig.5.32.....	Pag.109
Fig.5.33.....	Pag.110
Fig.5.34.....	Pag.110
Fig.5.35.....	Pag.111
Fig.5.36.....	Pag.112
Fig.5.37.....	Pag.112
Fig.5.38.....	Pag.115
Fig.5.39.....	Pag.115
Fig.5.40.....	Pag.116
Fig.5.41.....	Pag.117
Fig.5.42.....	Pag.118
Fig.5.43.....	Pag.119

**Índice de Ecuaciones**Capítulo 3:

Ec.3.1.....	Pag.21
Ec.3.2.....	Pag.21
Ec.3.3.....	Pag.21
Ec.3.4.....	Pag.21
Ec.3.5.....	Pag.21
Ec.3.6.....	Pag.22
Ec.3.7.....	Pag.22
Ec.3.8.....	Pag.22
Ec.3.9.....	Pag.22
Ec.3.10.....	Pag.22
Ec.3.11.....	Pag.23
Ec.3.12.....	Pag.23
Ec.3.13.....	Pag.23
Ec.3.14.....	Pag.23
Ec.3.15.....	Pag.23
Ec.3.16.....	Pag.23
Ec.3.17.....	Pag.24
Ec.3.18.....	Pag.24
Ec.3.19.....	Pag.24
Ec.3.20.....	Pag.24
Ec.3.21.....	Pag.25
Ec.3.22.....	Pag.25
Ec.3.23.....	Pag.25
Ec.3.24.....	Pag.25
Ec.3.25.....	Pag.25
Ec.3.26.....	Pag.26
Ec.3.27.....	Pag.26
Ec.3.28.....	Pag.26
Ec.3.29.....	Pag.26
Ec.3.30.....	Pag.26
Ec.3.31.....	Pag.27
Ec.3.32.....	Pag.27
Ec.3.33.....	Pag.27
Ec.3.34.....	Pag.27
Ec.3.35.....	Pag.27
Ec.3.36.....	Pag.28
Ec.3.37.....	Pag.28



Ec.3.38.....	Pag.28
Ec.3.39.....	Pag.28
Ec.3.40.....	Pag.28
Ec.3.41.....	Pag.28
Ec.3.42.....	Pag.28
Ec.3.43.....	Pag.29
Ec.3.44.....	Pag.29
Ec.3.45.....	Pag.29
Ec.3.46.....	Pag.29
Ec.3.47.....	Pag.29
Ec.3.48.....	Pag.29
Ec.3.49.....	Pag.30
Ec.3.50.....	Pag.34
Ec.3.51.....	Pag.35
Ec.3.52.....	Pag.35
Ec.3.53.....	Pag.35
Ec.3.54.....	Pag.36
Ec.3.55.....	Pag.36
Ec.3.56.....	Pag.36
Ec.3.57.....	Pag.36
Ec.3.58.....	Pag.36
Ec.3.59.....	Pag.37
Ec.3.60.....	Pag.37
Ec.3.61.....	Pag.39
Ec.3.62.....	Pag.39
Ec.3.63.....	Pag.42
Ec.3.64.....	Pag.42
Ec.3.65.....	Pag.43
Ec.3.66.....	Pag.44
Ec.3.67.....	Pag.44
Ec.3.68.....	Pag.44
Ec.3.69.....	Pag.44
Ec.3.70.....	Pag.45
Ec.3.71.....	Pag.51
Ec.3.72.....	Pag.51
Ec.3.73.....	Pag.51
Ec.3.74.....	Pag.51
Ec.3.75.....	Pag.51
Ec.3.76.....	Pag.54
Ec.3.77.....	Pag.55

Capítulo 4:

Ec.4.1.....	Pag.67
Ec.4.2.....	Pag.67
Ec.4.3.....	Pag.68
Ec.4.4.....	Pag.68
Ec.4.5.....	Pag.68
Ec.4.6.....	Pag.68
Ec.4.7.....	Pag.68
Ec.4.8.....	Pag.69
Ec.4.9.....	Pag.69
Ec.4.10.....	Pag.69
Ec.4.11.....	Pag.69
Ec.4.12.....	Pag.69
Ec.4.13.....	Pag.70
Ec.4.14.....	Pag.70
Ec.4.15.....	Pag.70
Ec.4.16.....	Pag.70
Ec.4.17.....	Pag.70
Ec.4.18.....	Pag.71
Ec.4.19.....	Pag.71
Ec.4.20.....	Pag.71
Ec.4.21.....	Pag.71
Ec.4.22.....	Pag.71
Ec.4.23.....	Pag.72
Ec.4.24.....	Pag.72
Ec.4.25.....	Pag.72
Ec.4.26.....	Pag.72
Ec.4.27.....	Pag.72
Ec.4.28.....	Pag.72
Ec.4.29.....	Pag.72
Ec.4.30.....	Pag.72
Ec.4.31.....	Pag.73
Ec.4.32.....	Pag.73
Ec.4.33.....	Pag.73
Ec.4.34.....	Pag.73
Ec.4.35.....	Pag.73
Ec.4.36.....	Pag.73
Ec.4.37.....	Pag.73
Ec.4.38.....	Pag.73
Ec.4.39.....	Pag.74



Ec.4.40.....	Pag.74
Ec.4.41.....	Pag.75
Ec.4.42.....	Pag.75
Ec.4.43.....	Pag.75
Ec.4.44.....	Pag.75
Ec.4.45.....	Pag.75
Ec.4.46.....	Pag.75
Ec.4.47.....	Pag.75
Ec.4.48.....	Pag.76
Ec.4.49.....	Pag.76
Ec.4.50.....	Pag.76
Ec.4.51.....	Pag.76
Ec.4.52.....	Pag.77
Ec.4.53.....	Pag.77
Ec.4.54.....	Pag.77
Ec.4.55.....	Pag.77
Ec.4.56.....	Pag.77
Ec.4.57.....	Pag.77
Ec.4.58.....	Pag.78
Ec.4.59.....	Pag.78
Ec.4.60.....	Pag.78
Ec.4.61.....	Pag.78
Ec.4.62.....	Pag.78
Ec.4.63.....	Pag.78
Ec.4.64.....	Pag.79
Ec.4.65.....	Pag.79
Ec.4.66.....	Pag.79
Ec.4.67.....	Pag.79
Ec.4.68.....	Pag.79
Ec.4.69.....	Pag.79
Ec.4.70.....	Pag.80
Ec.4.71.....	Pag.80
Ec.4.72.....	Pag.80
Ec.4.73.....	Pag.80
Ec.4.74.....	Pag.80
Ec.4.75.....	Pag.81
Ec.4.76.....	Pag.81
Ec.4.77.....	Pag.81
Ec.4.78.....	Pag.81